

Том 21, № 05, 2018

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

# Научный Вестник МГТУ ГА

---

---

## Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 21, No. 05, 2018

Издается с 1998 г.

Москва  
2018

*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.т.н., 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, к.филос.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;  
*Полешкина И.О.*, к.э.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

#### Члены главной редакции:

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

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

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

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

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

*Шапкин В.С.*, заслуженный работник транспорта РФ, проф., д.т.н., Москва, Россия;

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

*Сюй Хаудзюнь*, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хиан, Китай;

*Сайдахмедов Р.Х.*, проф., д.т.н., Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан;

*Франко Персиани*, PhD, директор Межведомственного Центра промышленных исследований в авионавтике, Болонский университет, Болонья, Италия;

*Владимир Немец*, PhD, Факультет транспортных наук, Отделение воздушного транспорта, Чешский технический университет, Прага, Чешская республика;

*Станислав Сзабо*, PhD, Факультет авионавтики, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая республика.

### Chief Editorial Board

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

### Members of the chief editorial Board:

*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;

*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;

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

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

*Vacily S. Shapkin*, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia;

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

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

*Ravshan H. Saydakhmedov*, Professor, Doctor of Sciences, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;

*Franco Persiani*, PhD, Director of Centre, University of Bologna, Bologna, Italy;

*Vladimir Nemez*, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Department of Air Transport, Czech Technical University in Prague, 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 автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

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

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

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

**Вышинский В.В.**, проф., д.т.н., 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;

**Кубланов М.С.**, проф., д.т.н., профессор МГТУ ГА, 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;

**Нечаев Е.Е.**, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

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

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

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

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

**Халютин С.П.**, проф., д.т.н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская 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, 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;

**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;

**Michael S. Kublanov**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 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;

**Evgeniy E. Nechaev**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, 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;

**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**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 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 "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТРАНСПОРТ

**Косачевский С.Г., Айдаркин Д.В., Качан Д.В.**

Оценка эффективности методики первоначальной профессиональной подготовки пилотов для эксплуатации самолетов с электронными системами отображения информации ..... 8

**Кулаков М.В., Чехов И.А.**

Анализ технологии взаимодействия органов ОВД на рубежах приема-передачи управления ..... 23

**Малыгин В.Б.**

Методика поддержания целостности потока прибытия на основе характеристик режима постоянного снижения ..... 33

**Никулин А.О.**

Система совместного принятия решений как эффективный инструмент организации работы аэропорта в условиях пиковых нагрузок ..... 43

**Скрыпник О.Н., Арефьева Н.Г., Арефьев Р.О.**

Оптимизация траектории полета воздушного судна в динамичном поле точности ГЛОНАСС ..... 56

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А., Тан Бяо**

Постановка многокритериальной задачи маршрутизации и планирования графиков полета пилотируемой и беспилотной авиации в динамической обстановке и подход к ее решению с помощью генетических алгоритмов ..... 67

**Николаев С.В., Тихонов А.А., Меренцов Д.С.**

Определение в испытаниях вероятности выхода летательного аппарата в информационный контакт с воздушными объектами ..... 78

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

**Акиншин Р.Н., Петешов А.В.**

Информационные показатели радиолокационных портретов воздушных объектов и обобщенные показатели способности систем распознавания по извлечению информации ... 94

**Борисов Е.Г.**

Определение местоположения воздушных объектов в полистатической радиолокационной системе, паразитирующей на излучении телекоммуникационных систем ..... 105

**Болелов Э.А.**

Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения ..... 117

**Горелик А.Г., Коломиец С.Ф.**

Применимость феноменологических моделей турбулентности в экспериментальных исследованиях ..... 130

**Кораблев Ю.Н.**

Оперативное информирование экипажей воздушных судов об опасных метеоявлениях в районах арктических посадочных площадок ..... 137

## CONTENTS

### TRANSPORT

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Kosachevskiy S.G., Aidarkin D.V., Kachan D.V.</b><br>Evaluation of the effectiveness methods of initial pilots' professional training to operate the aircraft equipped with electronic flight instrument systems ..... | 8  |
| <b>Kulakov M.V., Chekhov I.A.</b><br>Analysis of the coordination technology between ATC at the boundaries of control exchange .....                                                                                      | 23 |
| <b>Malygin V.B.</b><br>Methodology of maintenance of arrival flow integrity based on the characteristics of the permanent reduction mode .....                                                                            | 33 |
| <b>Nikulin A.O.</b><br>The system of collaborative decision making as an effective tool for the organization of the airport operation in peak loads .....                                                                 | 43 |
| <b>Skrypnik O.N., Arefyeva N.G., Arefyev R.O.</b><br>Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field .....                                                                            | 56 |

### AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

|                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Lebedev G.N., Malygin V.B., Mikhaylin D.A., Tan Byo</b><br>Formulation of multicriteria problem of routing and scheduling of manned and unmanned aircraft in a dynamic environment and approach to its solution using genetic algorithms ..... | 67 |
| <b>Nikolaev S.V., Tikhonov A.A., Merencov D.S.</b><br>Definition in testing for the probability of exit of the aircraft in informational contact with air objects .....                                                                           | 78 |

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Akinshin R.N., Peteshov A.V.</b><br>Information indicators of radar portraits of air objects and generalized indicators of the ability of recognition systems to extract information ..... | 94  |
| <b>Borisov E.G.</b><br>Determination of the location of air objects in polistatic radar system parasitising on radiation telecommunication systems .....                                      | 105 |
| <b>Bolelov E.A.</b><br>Meteorological service for civil aviation: problems and ways of their solution .....                                                                                   | 117 |
| <b>Gorelik A.G., Kolomiets S.F.</b><br>A validity of phenomenological models of turbulence in experimental studies .....                                                                      | 130 |
| <b>Korablev Yu.N.</b><br>Operational notifying aircraft crew about dangerous meteorological phenomena in the zones of arctic landing sites .....                                              | 137 |

ТРАНСПОРТ

УДК 629.7.072.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-8-22

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПИЛОТОВ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ САМОЛЕТОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

С.Г. КОСАЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>, Д.В. АЙДАРКИН<sup>1</sup>, Д.В. КАЧАН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

В настоящее время образовательные организации гражданской авиации России, осуществляющие подготовку пилотов, полностью перешли на учебные воздушные суда нового поколения, особенностями которых являются высокая степень автоматизации управления и электронные системы отображения информации (EFIS – Electronic Flight Instrument System). При этом применяемые методы летного обучения основываются на исследованиях, проведенных для самолетов с аналоговыми системами отображения информации, что не позволяет в полной мере использовать широкие возможности нового поколения воздушных судов и тренажеров. Поэтому задача совершенствования методики первоначальной профессиональной подготовки пилотов, включающая обучение рациональным методам распределения и переключения зрительного внимания, является актуальной. Для решения этой задачи в 2017 году по заказу Федерального агентства воздушного транспорта Российской Федерации в Ульяновском институте гражданской авиации проведен комплекс научных исследований, позволивших разработать методику первоначальной летной подготовки пилотов с использованием воздушных судов с EFIS. При проведении исследований использовались окулометрические методы исследования распределения и переключения внимания курсантов (технология eye-tracking), что позволило более глубоко изучить формирование навыков пилотирования и влияние на них работы пилота с EFIS. Для оценки эффективности разработанной методики проведено две серии экспериментов, в которых участвовали курсанты Сасовского летного училища и Ульяновского института гражданской авиации, что позволило провести эксперименты на двух типах тренажеров самолетов: L-410 и DA40 NG. В статье предлагается использовать коэффициент корреляции и манхеттенское расстояние для оценки точности выдерживания параметров полета самолета в ходе тренажерной подготовки. По результатам первой серии экспериментов сделан вывод, что курсанты, отобранные в экспериментальную группу, имели более низкий исходный уровень летной подготовки по двум рассматриваемым критериям по сравнению с курсантами контрольной группы. Однако после проведенного обучения экспериментальной группы по разработанной методике уровень летной подготовки в обеих группах стал одинаковым. Для курсантов экспериментальной группы наблюдаются статистически значимые различия исходного и конечного уровней летной подготовки, в то время как курсанты контрольной группы завершили серию экспериментов без заметных изменений. Вторая серия экспериментов показала, что отсутствие летной практики у курсантов экспериментальной группы не помешало им продемонстрировать качественный уровень профессиональной подготовки при выполнении упражнений на летном тренажере. Такого результата помогла добиться проведенная с курсантами наземная подготовка по разработанной методике, что, несомненно, свидетельствует о ее эффективности.

**Ключевые слова:** первоначальная подготовка пилотов, самолет, электронные системы отображения информации, распределение и переключение зрительного внимания, коэффициент корреляции, манхеттенское расстояние, полет по приборам.

### ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в России произведена кардинальная модернизация материально-технической базы учебно-летного процесса, в результате чего для первоначальной профессиональной подготовки пилотов в подавляющем большинстве образовательных организаций гражданской авиации (ГА) используются воздушные суда (ВС), оборудованные электронными си-

стемами отображения информации (Electronic Flight Instrument System, EFIS) [1]. Вместе с тем до настоящего времени в Российской Федерации не проводились научные исследования, направленные на совершенствование методов первоначального обучения пилотов с учетом всех особенностей и возможностей нового поколения учебных ВС и тренажеров, в частности особенностей обучения пилотов рациональному распределению и переключению зрительного внимания (РПЗВ).

Необходимость проведения таких исследований подтверждается анализом результатов расследований авиационных происшествий и инцидентов, согласно которым летные экипажи современных самолетов могут терять контроль за основными параметрами полета из-за большой загрузки пилотов и применения ими нерациональных методов РПЗВ, что, в свою очередь, приводит к неправильному или несвоевременному восприятию информации и принятию решений. В этих условиях рациональная методика РПЗВ должна обеспечить пилотам резерв времени, необходимый как для контроля параметров полета, так и для выполнения всех необходимых действий [2].

Авиационные власти ряда государств и международные организации проводят исследования в этой области и разрабатывают соответствующие учебные пособия для пилотов<sup>1,2,3</sup>. Результаты исследований, проведенных в Великобритании, где была создана рабочая группа по анализу фактов потери управления в полете, и во Франции, где исследования проводились по инициативе Бюро по расследованию авиационных происшествий ВЕА, подтвердили наличие проблемы потери контроля за основными параметрами полета, чему способствуют дефицит времени и большая рабочая нагрузка пилотов<sup>4</sup>. В США похожие исследования проводились на тренажере самолета Boeing-747-400 с использованием окулометрических систем, обеспечивающих регистрацию и сопровождение движения глаз, что позволило сделать выводы о важности взаимосвязи зрительной деятельности пилотов и динамики параметров полета, а также о необходимости изучения и учета структуры зрительной деятельности пилотов в процессе подготовки летного состава [3].

Отечественный опыт подготовки пилотов свидетельствует о том, что умение правильно распределять и переключать зрительное внимание при выполнении полета по приборам является для пилота одной из наиболее сложных задач. Объясняется это тем, что, в отличие от многих осваиваемых пилотом навыков, которые выполняются по заранее разработанному алгоритму и поэтому могут быть доведены до автоматизма, навык РПЗВ является подвижным и неустойчивым, т. к. он основывается на анализе большого количества случайных факторов. Поэтому методы рационального распределения зрительного внимания формируются не как строго определенная последовательность перевода взгляда по приборам, а в виде определенных принципов, позволяющих пилоту сознательно определить последовательность осмотра приборов с учетом складывающейся полетной ситуации [4].

О необходимости разработки научно обоснованных методов обучения пилотов рациональному распределению внимания при эксплуатации самолетов с EFIS свидетельствуют результаты опроса опытных пилотов, показавшего отсутствие у них понимания формирования принципов взаимодействия пилота с EFIS [5, 6].

Практика показывает, что многие пилоты, не овладевшие рациональным РПЗВ, могут обеспечить необходимое качество пилотирования самолета по приборам в нормальных условиях. Однако при возникновении в полете усложняющих обстоятельств, связанных, например, с

<sup>1</sup> Instrument Flying Handbook: FAA Handbook: FAA-H-8083-15B / U.S. Department of Transportation. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2013. 368 p.

<sup>2</sup> Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge / Federal Aviation Administration. Skyhorse Publishing, 2017. 470 p.

<sup>3</sup> Advanced Avionics Handbook / Federal Aviation Administration. Skyhorse Publishing, 2012. 128 p.

<sup>4</sup> Study on Aeroplane State Awareness during Go-Around / Bureau d'Enquêtes et d'Analyse pour la sécurité de l'aviation civile. 2013. 142 p.

отказами авиационной техники, у них не остается необходимого резерва внимания для устранения возникшего отказа.

Для решения указанных задач в 2017 году по заказу Федерального агентства воздушного транспорта Ульяновским институтом гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева (УИ ГА) совместно с НИИ медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова и ООО «Новые информационные технологии в авиации» выполнена научно-исследовательская работа, в рамках которой разработана методика первоначальной летной подготовки пилотов в российских летных учебных заведениях ГА с использованием ВС с EFIS и высокой степенью автоматизации управления. Дополнительно к указанной методике разработаны рекомендации по обучению курсантов летных учебных заведений методам РПЗВ в полете по приборам, исключающему непреднамеренный вывод самолета за пределы эксплуатационных ограничений.

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПИЛОТИРОВАНИЯ

Совершенствование методики первоначального летного обучения невозможно без проведения исследований, предполагающих использование критериев не только для конечной оценки качества пилотирования, но и для анализа процесса формирования у курсантов необходимых навыков и компетенций. В действующих программах для оценки качества пилотирования используются бинарные критерии, отражающие способность или неспособность курсанта выдерживать параметры полета в заданном интервале, которые не позволяют выявить тенденцию развития навыков пилотирования и правильного восприятия информации. Способность записывать значения различных параметров полета с высокой частотой дискретизации, реализованная на современных летных тренажерах, используемых в образовательных организациях ГА, дает возможность разработать и использовать новые подходы к оценке качества пилотирования.

В работе [7] показано, что аналогом коэффициента корреляции Пирсона, используемым для определения степени близости двух функций  $f(t)$  и  $g(t)$ , заданных набором значений  $f_i = f(t_i)$  и  $g_i = g(t_i)$  в  $n$  точках  $t_i$  с высокой частотой дискретизации на интервале от  $t_0 = a$  до  $t_n = b$ , является коэффициент корреляции, вычисляемый по формуле

$$r_{fg} = \frac{\frac{1}{b-a} \int_a^b f(t) \cdot g(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b f^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b g^2(t) dt}} = \frac{\int_a^b f(t) \cdot g(t) dt}{\sqrt{\int_a^b f^2(t) dt} \cdot \sqrt{\int_a^b g^2(t) dt}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что коэффициент корреляции будет меньше нуля лишь в том случае, когда используемые для расчета значения функций  $f(t)$  и  $g(t)$  имеют разные знаки. Однако многие параметры полета самолета (например, его высота, приборная и воздушная скорости) не принимают отрицательных значений. В этом случае для расчета по формуле (1) можно использовать отклонения параметров полета относительно их среднего значения, вычисленного для исследуемого интервала времени.

Коэффициент корреляции (1) может применяться для сравнения значений параметров полета, наблюдаемых в ходе тренажерной подготовки курсантов, с соответствующими эталонными значениями. Чем ближе к единице значение этого критерия в ходе оценки точности выдерживания параметров полета ВС на летном тренажере, тем лучше выдерживаются эти параметры испытуемым. Следует отметить, что главным недостатком коэффициента корреляции (1) является его нечувствительность к масштабированию функций.

Второй по популярности группой мер сходства являются разнообразные меры расстояния. В то время как для рассмотренных выше коэффициентов корреляции значение, близкое к нулю, свидетельствует о том, что исследуемые объекты не похожи друг на друга, равное нулю расстояние между объектами можно получить только в том случае, если два объекта идентичны, т. е. описывающие их переменные принимают одинаковые значения.

В качестве меры сходства графиков двух функций  $f(t)$  и  $g(t)$ , заданных дискретными значениями на интервале от  $t_0 = a$  до  $t_n = b$ , в работе [7] предложено использовать манхеттенское расстояние, определяемое безразмерным коэффициентом

$$\bar{d}_{fg} = \frac{\int_a^b |f(t) - g(t)| dt}{\int_a^b g(t) dt}, \quad (2)$$

где функция  $f(t)$  соответствует наблюдаемым значениям параметра полета в ходе тренажерной подготовки, а функция  $g(t)$  – эталонным значениям.

Несмотря на важность метрик расстояния, они тоже имеют недостатки, главным из которых является нечувствительность к форме графиков сравниваемых функций.

Рассмотренные меры сходства имеют свои достоинства и недостатки, взаимно дополняя друг друга. Поэтому предлагается одновременно использовать коэффициент корреляции (1) и манхеттенское расстояние (2) для оценки точности выдерживания параметров полета ВС в ходе первоначальной подготовки пилотов на летном тренажере. Совместное применение этих мер сходства позволяет оценить как форму графика зависимости исследуемого параметра полета от времени, так и точность его выдерживания по сравнению с эталонной зависимостью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая серия экспериментов по оценке эффективности разработанной методики проводилась в Сасовском ЛУ ГА – филиале УИ ГА на тренажере самолета L-410. Для проведения эксперимента были сформированы экспериментальная и контрольная группы курсантов по 10 человек каждая. Все отобранные для эксперимента курсанты завершили летную подготовку на самолете первоначального обучения Cessna-172 и приступили к выполнению полетов на выпускном самолете L-410.

На первом этапе каждый курсант выполнил заход на посадку по инструментальной системе неточного захода на посадку ОСП с включенными огнями подхода и огнями приближения полосы. Полет начинался в районе 3-го разворота на удалении 6 морских миль (11,1 км) от торца полосы на высоте 600 метров в посадочной конфигурации и заканчивался на высоте 60 м. После выполнения первого полета с курсантами экспериментальной группы было проведено занятие по разработанной методике обучения РПЗВ для самолета с EFIS.

На втором этапе курсанты контрольной и экспериментальной групп повторно выполнили заход на посадку с целью оценки эффективности проведенной подготовки курсантов экспериментальной группы. В табл. 1 и 2 приведены значения оценок точности выдерживания высоты полета ВС в ходе первоначальной подготовки пилотов на летном тренажере. В качестве критериев для оценки качества пилотирования на начальном этапе тренажерной подготовки использовались коэффициент корреляции  $r_{fg}$  и манхеттенское расстояние  $d_{fg}$ , вычисленные по формулам (1) и (2) соответственно.

**Таблица 1**  
**Table 1**

Результаты оценки качества пилотирования в экспериментальной группе  
The results of piloting quality assessment for a cadet group under experiment

| Испытуемые<br>(cadets)                           | Исходный уровень<br>критерия<br>(initial level<br>of the criterion) |                       | Конечный уровень<br>критерия<br>(final level<br>of the criterion) |                       | Изменение, $z$<br>(changes) |             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|
|                                                  | $r_{fg \text{ исх.}}$                                               | $d_{fg \text{ исх.}}$ | $r_{fg \text{ кон.}}$                                             | $d_{fg \text{ кон.}}$ | $z(r_{fg})$                 | $z(d_{fg})$ |
| Курсант 1                                        | 0,9586                                                              | 29,07 %               | 0,9817                                                            | 18,44 %               | 0,0231                      | -10,63 %    |
| Курсант 2                                        | 0,9796                                                              | 33,11 %               | 0,9822                                                            | 17,40 %               | 0,0027                      | -15,71 %    |
| Курсант 3                                        | 0,9662                                                              | 28,88 %               | 0,9896                                                            | 17,78 %               | 0,0233                      | -11,10 %    |
| Курсант 4                                        | 0,9754                                                              | 25,96 %               | 0,9871                                                            | 15,40 %               | 0,0118                      | -10,57 %    |
| Курсант 5                                        | 0,9645                                                              | 36,66 %               | 0,9955                                                            | 8,87 %                | 0,0310                      | -27,80 %    |
| Курсант 6                                        | 0,9974                                                              | 21,27 %               | 0,9890                                                            | 14,33 %               | -0,0084                     | -6,95 %     |
| Курсант 7                                        | 0,9433                                                              | 51,32 %               | 0,9993                                                            | 3,40 %                | 0,0560                      | -47,92 %    |
| Курсант 8                                        | 0,9889                                                              | 14,59 %               | 0,9982                                                            | 8,47 %                | 0,0093                      | -6,12 %     |
| Курсант 9                                        | 0,9857                                                              | 17,00 %               | 0,9785                                                            | 19,27 %               | -0,0071                     | 2,27 %      |
| Курсант 10                                       | 0,9549                                                              | 29,85 %               | 0,9893                                                            | 13,77 %               | 0,0344                      | -16,08 %    |
| Среднее<br>выборочное, $\bar{x}_{\text{выб}}$    | 0,97145                                                             | 28,77 %               | 0,98905                                                           | 13,71 %               | 0,01760                     | -15,06 %    |
| Исправленная<br>выборочная<br>дисперсия, $s_x^2$ | 0,00029                                                             | 0,0111                | 0,00005                                                           | 0,0027                | 0,00040                     | 0,0194      |

По имеющимся данным найдены основные статистические оценки параметров распределения (среднее выборочное и значение исправленной выборочной дисперсии) для экспериментальной и контрольной групп курсантов.

**Таблица 2**  
**Table 2**

Результаты оценки качества пилотирования в контрольной группе  
The results of piloting quality assessment for a cadet control group

| Испытуемые<br>(cadets) | Исходный уровень<br>критерия<br>(initial level<br>of the criterion) |                       | Конечный уровень<br>критерия<br>(final level<br>of the criterion) |                       | Изменение, $z$<br>(changes) |             |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|
|                        | $r_{fg \text{ исх.}}$                                               | $d_{fg \text{ исх.}}$ | $r_{fg \text{ кон.}}$                                             | $d_{fg \text{ кон.}}$ | $z(r_{fg})$                 | $z(d_{fg})$ |
| Курсант 11             | 0,9904                                                              | 16,21 %               | 0,9933                                                            | 11,34 %               | 0,0030                      | -4,87 %     |
| Курсант 12             | 0,9970                                                              | 12,67 %               | 0,9950                                                            | 9,66 %                | -0,0020                     | -3,01 %     |
| Курсант 13             | 0,9981                                                              | 9,71 %                | 0,9846                                                            | 17,37 %               | -0,0135                     | 7,66 %      |
| Курсант 14             | 0,9951                                                              | 9,97 %                | 0,9863                                                            | 19,19 %               | -0,0088                     | 9,22 %      |
| Курсант 15             | 0,9826                                                              | 20,22 %               | 0,9901                                                            | 15,08 %               | 0,0075                      | -5,14 %     |
| Курсант 16             | 0,9990                                                              | 6,70 %                | 0,9811                                                            | 18,52 %               | -0,0180                     | 11,82 %     |

Продолжение таблицы 2

| Испытуемые<br>(cadets)                           | Исходный уровень<br>критерия<br>(initial level<br>of the criterion) |                       | Конечный уровень<br>критерия<br>(final level<br>of the criterion) |                       | Изменение, $z$<br>(changes) |             |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|
|                                                  | $r_{fg \text{ исх.}}$                                               | $d_{fg \text{ исх.}}$ | $r_{fg \text{ кон.}}$                                             | $d_{fg \text{ кон.}}$ | $z(r_{fg})$                 | $z(d_{fg})$ |
| Курсант 17                                       | 0,9597                                                              | 34,40 %               | 0,9941                                                            | 10,24 %               | 0,0344                      | -24,16 %    |
| Курсант 18                                       | 0,9753                                                              | 32,35 %               | 0,9929                                                            | 12,94 %               | 0,0175                      | -19,41 %    |
| Курсант 19                                       | 0,9860                                                              | 15,43 %               | 0,9962                                                            | 8,32 %                | 0,0102                      | -7,10 %     |
| Курсант 20                                       | 0,9868                                                              | 17,79 %               | 0,9946                                                            | 10,52 %               | 0,0078                      | -7,27 %     |
| Среднее<br>выборочное, $\bar{y}_{\text{выб}}$    | 0,98701                                                             | 17,54 %               | 0,99082                                                           | 13,32 %               | 0,00381                     | -4,23 %     |
| Исправленная<br>выборочная<br>дисперсия, $s_y^2$ | 0,00015                                                             | 0,0086                | 0,00003                                                           | 0,0016                | 0,00024                     | 0,0136      |

С помощью критерия Фишера – Снедекора [8] проверялась нулевая гипотеза о равенстве генеральных дисперсий при конкурирующей гипотезе  $D(X) > D(Y)$ . Например, для исходного уровня коэффициента корреляции  $r_{fg}$  получено

$$F_{\text{набл}}(r_{fg \text{ исх.}}) = \frac{s_x^2}{s_y^2} = \frac{0,00029}{0,00015} \approx 1,9080. \quad (3)$$

Аналогично найдены значения критерия Фишера – Снедекора для исходного уровня манхеттенского расстояния  $d_{fg}$ , а также конечного уровня обоих критериев.

$$F_{\text{набл}}(d_{fg \text{ исх.}}) \approx 1,2807; F_{\text{набл}}(r_{fg \text{ кон.}}) \approx 1,8797; F_{\text{набл}}(d_{fg \text{ кон.}}) \approx 1,7329.$$

По таблице критических точек распределения Фишера – Снедекора [9] для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и чисел степеней свободы  $k_1 = 9$ ,  $k_2 = 9$  найдем критическую точку:

$$F_{\text{кр}}(\alpha; k_1, k_2) = F_{\text{кр}}(0,05; 9; 9) = 3,18.$$

Так как для всех рассмотренных критериев качества пилотирования выполняется условие  $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$ , то нет оснований отвергать гипотезу о равенстве генеральных дисперсий. То есть выборочные исправленные дисперсии отличаются незначимо, что свидетельствует о том, что точность измерения значений критериев качества пилотирования в обеих группах была одинаковой.

Затем при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  проверялась нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий (генеральных средних) двух малых выборок ( $n = m = 10$ ), предполагая, что они извлечены из нормальных генеральных совокупностей с одинаковыми дисперсиями,

$$H_0: M(X) = M(Y)$$

при конкурирующей гипотезе

$$H_1: M(X) \neq M(Y).$$

Чтобы сравнить средние выборочные для исходного уровня коэффициента корреляции в экспериментальной и контрольной группах, вычислялось наблюдаемое значение критерия Стьюдента [10] для независимых выборок по формуле

$$T_{\text{набл}} = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\sqrt{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot m(n+m-2)}{n+m}}. \quad (4)$$

Подставив числовые значения входящих в эту формулу величин, получим  $T_{\text{набл}}(r_{fg \text{ исх.}}) \approx 2,3618$ .

Конкурирующая гипотеза имеет вид  $M(X) \neq M(Y)$ , поэтому критическая область двусторонняя. Для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы  $k = n + m - 2 = 18$  имеем критическую точку  $t_{\text{двуст. кр}}(0,05; 18) = 2,1009$ . Так как  $T_{\text{набл}}(r_{fg \text{ исх.}}) > t_{\text{двуст. кр}}$ , то нулевую гипотезу о равенстве средних следует отвергнуть. Другими словами, выборочные средние исходного уровня коэффициента корреляции в экспериментальной и контрольной группах различаются статистически значимо, т. е. курсанты экспериментальной группы имели более низкий исходный уровень летной подготовки по указанному критерию качества пилотирования.

Похожий результат получен в ходе сравнения средних выборочных для исходного уровня манхеттенского расстояния в экспериментальной и контрольной группах. Наблюдаемое значение критерия Стьюдента, вычисленное по формуле (4),  $T_{\text{набл}}(d_{fg \text{ исх.}}) \approx -2,5305$ . Поэтому нулевую гипотезу о равенстве средних выборочных для исходного уровня манхеттенского расстояния в экспериментальной и контрольной группах также следует отвергнуть, т. е. курсанты экспериментальной группы имели более низкий исходный уровень летной подготовки и по второму выбранному критерию качества пилотирования.

Иной результат был получен в ходе сравнения средних выборочных конечного уровня коэффициента корреляции и манхеттенского расстояния после проведенной подготовки курсантов экспериментальной группы по разработанной методике первоначальной профессиональной подготовки пилотов для эксплуатации самолетов с EFIS.

Наблюдаемые значения критерия Стьюдента, вычисленные по формуле (4):

$$T_{\text{набл}}(r_{fg \text{ кон.}}) \approx 0,6432; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg \text{ кон.}}) \approx -0,1911.$$

При конкурирующей гипотезе  $M(X) \neq M(Y)$  для указанного уровня значимости и числа степеней свободы для обоих критериев получим неравенство  $|T_{\text{набл}}| < t_{\text{двуст. кр}}$ , т. е. нет оснований отвергать нулевую гипотезу о равенстве средних выборочных для конечного уровня выбранных критериев качества пилотирования в экспериментальной и контрольной группах после проведенной подготовки, значит уровень летной подготовки в обеих группах стал одинаковым.

Рассмотрим теперь, каким образом повлиял использованный метод профессиональной подготовки курсантов на изменение значений критериев качества пилотирования отдельно для каждой группы испытуемых. Исходно требуется при выбранном уровне значимости проверить нулевые гипотезы о равенстве генеральных средних нормальных совокупностей критериев качества пилотирования с неизвестными дисперсиями по соответствующим парам зависимых выборок одинакового объема отдельно в экспериментальной и контрольной группах.

Задачу сравнения двух средних можно свести к задаче сравнения одной выборочной средней с гипотетическим значением генеральной средней, рассмотрев в качестве случайной величины изменения критериев качества пилотирования:

$$z(r_{fg}) = \bar{r}_{fg \text{ кон.}} - \bar{r}_{fg \text{ исх.}}; \quad z(d_{fg}) = \bar{d}_{fg \text{ кон.}} - \bar{d}_{fg \text{ исх.}}$$

Тогда нулевые гипотезы примут вид

$$H_0: M(\bar{z}(r_{fg})) = 0, \quad H_0: M(\bar{z}(d_{fg})) = 0,$$

а конкурирующие гипотезы можно записать так:

$$H_1: M(\bar{z}(r_{fg})) \neq 0, \quad H_1: M(\bar{z}(d_{fg})) \neq 0.$$

В качестве критерия согласия используем коэффициент Стьюдента, вычисляемый по формуле (8)

$$T_{\text{набл}}(z) = \frac{\bar{z} \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{\frac{\sum z_i^2 - (\sum z_i)^2 / n}{n-1}}} = \frac{\bar{z} \cdot \sqrt{n}}{s_z}. \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулу (5), получим для экспериментальной группы

$$T_{\text{набл}}(z(r_{fg})) \approx 2,7796; \quad T_{\text{набл}}(z(d_{fg})) \approx -3,4199.$$

Для указанных конкурирующих гипотез имеем двустороннюю критическую область. Для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы  $k = n - 1 = 9$  найдем критическую точку  $t_{\text{двуст. кр}}(0,05; 9) = 2,262$ . Так как  $T_{\text{набл}}(z(r_{fg})) > t_{\text{двуст. кр}}$  и  $|T_{\text{набл}}(z(d_{fg}))| > t_{\text{двуст. кр}}$ , то нулевую гипотезу о равенстве средних следует отвергнуть. Другими словами, выборочные средние исходного и конечного уровней выбранных критериев качества пилотирования в экспериментальной группе различаются статистически значимо, т.е. подготовка курсантов экспериментальной группы с помощью предлагаемой методики оказалась результативной.

Проведя аналогичные вычисления, получим для контрольной группы

$$T_{\text{набл}}(z(r_{fg})) \approx 0,7777; \quad T_{\text{набл}}(z(d_{fg})) \approx -1,1445.$$

Сравнивая полученные значения с критической точкой, можно сделать вывод, что нет оснований отвергать нулевую гипотезу о равенстве средних выборочных для исходного и конечного уровня выбранных критериев качества пилотирования в контрольной группе, значит, качество летной подготовки осталось на прежнем уровне.

Дальнейшие исследования по оценке эффективности разработанной методики проводились в тренажерном центре УИ ГА на тренажере DA40 NG. Были сформированы контрольная и экспериментальная группы. В контрольную группу вошли 5 курсантов, полностью завершивших летную подготовку на самолете первоначального обучения DA40 NG с налетом 100 часов. Экспериментальная группа была сформирована из 6 курсантов, прошедших полный курс теоретической и наземной подготовки к полетам на данном типе ВС, за-

вершивших первоначальную подготовку на тренажере в объеме 15 часов, но не приступавших к полетам на самолете. Подготовка курсантов экспериментальной группы проводилась по разработанной методике, а курсанты контрольной группы завершили подготовку на самолете первоначального обучения по действующей программе, но без дополнительных занятий по разработанной методике.

Каждый курсант выполнил три упражнения: заход на посадку в директорном режиме по инструментальной системе точного захода ILS CAT I (метеорологический минимум  $60 \times 550$  метров) с включенными огнями подхода и огнями приближения полосы, заход на посадку по неточной системе ОСП (NDB), а также восходящую спираль с креном  $30^\circ$  и вертикальной скоростью 500 ft/min.

В табл. 3 представлены результаты оценки качества пилотирования по приборам при заходе на посадку с использованием ILS для экспериментальной и контрольной групп. Результаты оценки качества пилотирования по приборам при заходе на посадку с использованием ОСП (NDB) показаны в табл. 4. В качестве критериев для оценки качества пилотирования в ходе выполнения этих упражнений использовались коэффициент корреляции и манхеттенское расстояние, вычисленные по формулам (1) и (2) для графиков, представляющих зависимость высоты ВС и его скорости от времени. Для оценки качества пилотирования при выполнении спирали применялись коэффициент корреляции и манхеттенское расстояние, вычисленные для графиков, представляющих зависимость высоты и крена ВС от времени. Соответствующие результаты оценки качества пилотирования для двух групп курсантов УИ ГА представлены в табл. 5.

Таблица 3  
Table 3

Результаты оценки качества пилотирования по приборам  
при заходе на посадку с использованием ILS  
The results of instrument piloting quality assessment for ILS approach

| Испытуемые<br>(cadets)                                     | Зависимость высоты от времени<br>(Dependence of height on time)              |                                                                       | Зависимость скорости от времени<br>(Dependence of velocity on time)          |                                                                       |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                                                            | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(H)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(H)$ | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(V)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(V)$ |
| Экспериментальная группа (the cadets under the experiment) |                                                                              |                                                                       |                                                                              |                                                                       |
| Курсант 1                                                  | 0,9966                                                                       | 4,88 %                                                                | 0,7862                                                                       | 2,26 %                                                                |
| Курсант 2                                                  | 0,9883                                                                       | 8,22 %                                                                | 0,9277                                                                       | 5,51 %                                                                |
| Курсант 3                                                  | 0,9926                                                                       | 6,78 %                                                                | 0,9504                                                                       | 7,13 %                                                                |
| Курсант 4                                                  | 0,9947                                                                       | 5,52 %                                                                | 0,8345                                                                       | 2,18 %                                                                |
| Курсант 5                                                  | 0,9947                                                                       | 5,40 %                                                                | 0,8590                                                                       | 3,75 %                                                                |
| Курсант 6                                                  | 0,9896                                                                       | 8,95 %                                                                | 0,8793                                                                       | 3,32%                                                                 |
| Контрольная группа (the reference group)                   |                                                                              |                                                                       |                                                                              |                                                                       |
| Курсант 1                                                  | 0,9951                                                                       | 4,65 %                                                                | 0,9397                                                                       | 6,10 %                                                                |
| Курсант 2                                                  | 0,9890                                                                       | 8,47 %                                                                | 0,8637                                                                       | 2,27 %                                                                |
| Курсант 3                                                  | 0,9936                                                                       | 5,59 %                                                                | 0,8732                                                                       | 5,97 %                                                                |
| Курсант 4                                                  | 0,9938                                                                       | 6,13 %                                                                | 0,8743                                                                       | 3,56 %                                                                |
| Курсант 5                                                  | 0,9986                                                                       | 12,59 %                                                               | 0,6687                                                                       | 1,17 %                                                                |

Таблица 4  
Table 4

Результаты оценки качества пилотирования по приборам  
при заходе на посадку с использованием ОСП (NDB)  
The results of instrument piloting quality assessment for NDB approach

| Испытуемые<br>(cadets)                                     | Зависимость высоты от времени                                                |                                                                       | Зависимость скорости от времени                                              |                                                                       |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                                                            | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(H)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(H)$ | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(V)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(V)$ |
| Экспериментальная группа (the cadets under the experiment) |                                                                              |                                                                       |                                                                              |                                                                       |
| Курсант 1                                                  | 0,9893                                                                       | 9,39 %                                                                | 0,8339                                                                       | 5,70 %                                                                |
| Курсант 2                                                  | 0,9964                                                                       | 5,57 %                                                                | 0,8889                                                                       | 4,86 %                                                                |
| Курсант 3                                                  | 0,9842                                                                       | 8,23 %                                                                | 0,8225                                                                       | 4,63 %                                                                |
| Курсант 4                                                  | 0,9883                                                                       | 6,75 %                                                                | 0,8847                                                                       | 3,55 %                                                                |
| Курсант 5                                                  | 0,9901                                                                       | 6,92 %                                                                | 0,7898                                                                       | 2,86 %                                                                |
| Курсант 6                                                  | 0,9932                                                                       | 6,67 %                                                                | 0,8184                                                                       | 2,56 %                                                                |
| Контрольная группа (the reference group)                   |                                                                              |                                                                       |                                                                              |                                                                       |
| Курсант 1                                                  | 0,9777                                                                       | 4,43 %                                                                | 0,8814                                                                       | 4,26 %                                                                |
| Курсант 2                                                  | 0,9955                                                                       | 5,43 %                                                                | 0,8704                                                                       | 2,93 %                                                                |
| Курсант 3                                                  | 0,9811                                                                       | 9,12 %                                                                | 0,8519                                                                       | 6,69 %                                                                |
| Курсант 4                                                  | 0,9831                                                                       | 8,20 %                                                                | 0,9110                                                                       | 3,36 %                                                                |
| Курсант 5                                                  | 0,9804                                                                       | 6,06 %                                                                | 0,8714                                                                       | 4,40 %                                                                |

Таблица 5  
Table 5

Результаты оценки качества пилотирования при выполнении спирали  
The results of piloting quality assessment while performing a spiral

| Испытуемые<br>(cadets)                                     | Зависимость высоты от времени                                                |                                                                       | Зависимость крена от времени                                                      |                                                                            |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                                            | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(H)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(H)$ | Коэффициент<br>корреляции<br>(the correlation<br>coefficient)<br>$r_{fg}(\gamma)$ | Манхеттенское<br>расстояние<br>(Manhattan<br>distance)<br>$d_{fg}(\gamma)$ |
| Экспериментальная группа (the cadets under the experiment) |                                                                              |                                                                       |                                                                                   |                                                                            |
| Курсант 1                                                  | 0,9323                                                                       | 16,08 %                                                               | 0,9658                                                                            | 3,98 %                                                                     |
| Курсант 2                                                  | 0,9739                                                                       | 13,41 %                                                               | 0,9923                                                                            | 9,02 %                                                                     |
| Курсант 3                                                  | 0,9949                                                                       | 6,45 %                                                                | 0,9806                                                                            | 10,67 %                                                                    |
| Курсант 4                                                  | 0,9980                                                                       | 5,71 %                                                                | 0,9961                                                                            | 6,11 %                                                                     |
| Курсант 5                                                  | 0,9363                                                                       | 18,63 %                                                               | 0,9920                                                                            | 4,90 %                                                                     |
| Курсант 6                                                  | 0,9305                                                                       | 9,85 %                                                                | 0,9861                                                                            | 3,06 %                                                                     |
| Контрольная группа (the reference group)                   |                                                                              |                                                                       |                                                                                   |                                                                            |
| Курсант 1                                                  | 0,9954                                                                       | 8,13 %                                                                | 0,9601                                                                            | 14,10 %                                                                    |
| Курсант 2                                                  | 0,9811                                                                       | 11,66 %                                                               | 0,9737                                                                            | 9,79 %                                                                     |
| Курсант 3                                                  | 0,9400                                                                       | 18,80 %                                                               | 0,9774                                                                            | 10,88 %                                                                    |
| Курсант 4                                                  | 0,9958                                                                       | 4,37 %                                                                | 0,9715                                                                            | 12,11 %                                                                    |
| Курсант 5                                                  | 0,9862                                                                       | 8,82 %                                                                | 0,9897                                                                            | 5,28 %                                                                     |

Так как для выбранного уровня значимости для всех рассмотренных критериев качества пилотирования выполняется условие  $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$ , то можно утверждать, что выборочные исправленные дисперсии отличаются незначимо, следовательно, точность измерения значений критериев качества пилотирования в обеих группах была одинаковой.

Затем при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  проверялась нулевая гипотеза о равенстве генеральных средних для указанных критериев качества пилотирования в выборках, представленных экспериментальной и контрольной группами, предполагая, что они извлечены из нормальных генеральных совокупностей с одинаковыми дисперсиями, при конкурирующей гипотезе  $H_1: M(X) \neq M(Y)$ . По формуле (4) получены следующие значения критерия Стьюдента для критериев оценки качества пилотирования при заходе на посадку с использованием ILS:

$$T_{\text{набл}}(r_{fg}(H)) \approx 0,629; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(H)) \approx 0,580; \quad T_{\text{набл}}(r_{fg}(V)) \approx 0,584; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(V)) \approx 0,172;$$

при заходе на посадку с использованием ОСП (NDB):

$$T_{\text{набл}}(r_{fg}(H)) \approx -1,966; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(H)) \approx -0,610; \quad T_{\text{набл}}(r_{fg}(V)) \approx 1,898; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(V)) \approx 0,372$$

и при выполнении спирали:

$$T_{\text{набл}}(r_{fg}(H)) \approx 1,095; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(H)) \approx -0,415; \quad T_{\text{набл}}(r_{fg}(\gamma)) \approx -1,666; \quad T_{\text{набл}}(d_{fg}(\gamma)) \approx 2,191.$$

С учетом двусторонней критической области для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы  $k = n + m - 2 = 9$  имеем критическую точку  $t_{\text{двуст. кр}}(0,05; 9) = 2,2622$ . Так как для всех рассмотренных критериев качества пилотирования выполняется условие

$$|T_{\text{набл}}| < t_{\text{двуст. кр}},$$

то нет оснований отвергать нулевую гипотезу о равенстве средних выборочных для критериев качества пилотирования в двух малых выборках, представленных экспериментальной и контрольной группами, после проведенной подготовки. Значит, уровень летной подготовки в обеих группах стал одинаковым при заходе на посадку с использованием ILS и ОСП (NDB), а также при выполнении спирали.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в первой серии экспериментов курсанты, отобранные в экспериментальную группу, имели более низкий исходный уровень летной подготовки по двум рассматриваемым критериям точности выдерживания высоты полета ВС в ходе первоначальной подготовки на летном тренажере самолета L-410 по сравнению с курсантами контрольной группы. Однако после проведенного обучения курсантов экспериментальной группы по разработанной методике первоначальной профессиональной подготовки пилотов для эксплуатации самолетов с EFIS уровень качества пилотирования в обеих группах стал одинаковым. Аналогичный вывод был получен в ходе оценки влияния метода профессиональной подготовки курсантов (с помощью предложенной методики для экспериментальной группы или действующей программы подготовки для контрольной группы) на изменение значений критериев качества пилотирования отдельно для каждой группы испыту-

емых, рассматривая их как зависимые выборки. Для курсантов экспериментальной группы наблюдаются статистически значимые различия исходного и конечного уровней качества пилотирования, в то время как курсанты контрольной группы завершили серию экспериментов без заметных изменений.

Вторая серия экспериментов, в ходе которой испытуемые выполняли три упражнения на тренажере DA40 NG, показала, что отсутствие летной практики у курсантов экспериментальной группы не помешало им продемонстрировать практически одинаковый уровень профессиональной подготовки при выполнении указанных упражнений по сравнению с курсантами контрольной группы, завершившими летную подготовку на самолете первоначального обучения DA-40NG и имевшими налет 100 часов. Такого результата курсантам экспериментальной группы помогла добиться проведенная с ними наземная подготовка по разработанной методике подготовки пилотов для эксплуатации самолетов с EFIS, что, несомненно, свидетельствует о ее эффективности. В качестве критериев для оценки качества пилотирования в ходе этой серии экспериментов использовались коэффициент корреляции и манхеттенское расстояние, вычисленные для графиков, представляющих зависимость высоты ВС, его скорости и угла крена от времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают влияние методов распределения и переключения зрительного внимания пилота при эксплуатации самолетов с EFIS на качество пилотирования. Исходя из этого, можно сделать вывод о важности разработки научно обоснованной методики первоначальной летной подготовки курсантов, включающей в себя освоение рациональных методов распределения и переключения зрительного внимания.

В качестве результатов проведенных исследований можно отметить разработанную методику оценки качества пилотирования на основе сочетания коэффициентов корреляции и манхеттенского расстояния, которая позволяет оценить не только качество пилотирования, но и процесс формирования у курсантов необходимых навыков и компетенций. Применение такого подхода в отличие от использования бинарных критериев, отражающих только способность курсанта выдерживать параметры полета в заданном интервале, позволяют выявить тенденцию развития навыков пилотирования и правильного восприятия информации, что особенно важно при первоначальном летном обучении. Также обоснована эффективность окулومترических измерений с использованием технологии ай-трекинга для исследования процессов распределения зрительного внимания пилота при работе с EFIS в процессе первоначального летного обучения.

На основе полученных результатов сформулированы предложения по совершенствованию методики первоначальной профессиональной подготовки пилотов и рекомендации по обучению курсантов летных учебных заведений ГА распределению зрительного внимания в полете по приборам, исключающему непреднамеренный вывод ВС за пределы эксплуатационных ограничений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столяров Н.А., Столяров Н.Н. Безопасность, контроль параметров полета и управление воздушным судном: монография. Ульяновск: УИ ГА, 2016. 138 с.
2. Столяров Н.А. Экспериментальные исследования распределения и переключения зрительного внимания пилотов самолетов с EFIS / С.Г. Косачевский, Д.А. Локайчук, С.Д. Королев, В.В. Максимова, С.А. Калинина, А.Г. Меркулова // Научный вестник УВАУ ГА. 2016. Т. 8. С. 50–56.

3. **Mumaw R.J.** A Simulator Study of Pilots' Monitoring Strategies and Performance on Modern Glass Cockpit Aircraft / M.I. Nicolice, N.B. Sarter, C.D. Wickens // Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings. 2001. 45(2). Pp. 73–77. DOI: 10.1177/154193120104500216.
4. **Кочаровский И.Б.** Распределение и переключение внимания при полете по приборам. М.: Воениздат, 1972. 104 с.
5. **Кузнецов И.Б.** Экспериментальные исследования зрительной деятельности пилота при пилотировании ВС с электронной системой отображения информации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 172. С. 122–128.
6. **Кузнецов И.Б.** Методология распределения внимания пилота. СПб.: Политехника, 2012. 167 с.
7. **Айдаркин Д.В., Качан Д.В., Косачевский С.Г.** Разработка критериев для оценки процесса формирования навыков пилотирования в ходе первоначального летного обучения пилотов // Научный вестник УИ ГА. 2017. № 9. С. 91–97.
8. **Sullivan M. III.** Fundamentals of Statistics. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2011. 720 p.
9. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юрайт, 2014. 479 с.
10. **Brandt S.** Data Analysis. Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers. 4th ed. Springer, 2014. 523 p.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Косачевский Сергей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, помощник по науке проректора по УНР Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, kosach-51@mail.ru.

**Айдаркин Дмитрий Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летной эксплуатации и безопасности полетов Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, aidarkin.dv@yandex.ru.

**Качан Дмитрий Владимирович**, начальник летно-методического центра Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, dmitry.k@inbox.ru.

#### EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS METHODS OF INITIAL PILOTS' PROFESSIONAL TRAINING TO OPERATE THE AIRCRAFT EQUIPPED WITH ELECTRONIC FLIGHT INSTRUMENT SYSTEMS

**Sergey G. Kosachevskiy<sup>1</sup>, Dmitriy V. Aidarkin<sup>1</sup>, Dmitriy V. Kachan<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

#### ABSTRACT

Nowadays, educational institutions carrying out pilots' training in the Russian Federation use completely new generation aircraft different with high degree of control automatisation (EFIS – Electronic Flight Instrument System). At the same time, the applied methods of flight training are based on studies carried out for aircraft with analog instruments, which does not allow to use new generation aircraft and simulators wide possibilities at their full capacity. Therefore, there is a vital necessity of enhancing the method of pilots' initial professional training that should contain teaching rational methods of distribution and switching visual attention. In 2017 in accordance with the Order of the Federal Air Transport Agency of the Russian Federation in the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation a complex of research was carried out that allowed developing the method of initial pilots' flight training

on the aircraft equipped with EFIS. During the research, the oculometric research methods of cadets' distribution and switching attention (the "eye-tracking" technology) were used, which allowed a deeper study of the piloting skills formation and their impact on pilot's operation with EFIS. To assess the effectiveness of the developed methods, two series of experiments involving cadets of Ulyanovsk Institute of Civil Aviation and its branch in Sasovo were conducted. Two types of simulators: L-410 and Diamond 40 NG were used for research purposes. In this article it is proposed to use the correlation coefficient and the Manhattan distance to assess the accuracy of maintaining flight parameters during cadet simulator training. According to the results of the first series of experiments, it was found out that the cadets under the experiment showed a lower level of flight training compared to the control group of cadets. However, after training the group under the experiment on the developed method, a level of flight preparation in the both groups became equal. Statistically significant differences of initial and final levels of flight training for the cadets of the experimental group were observed while cadets of a control group completed the series of experiments without any significant changes. The second series of experiments revealed that the lack of flight practice among the cadets of the experimental group did not prevent them from demonstrating a qualitative level of professional training when practicing on the flight simulator. Such a result was achieved due to the ground preparation of cadets on the developed method what, undoubtedly, indicates its effectiveness.

**Key words:** pilots' initial training, airplane, electronic flight instrument system, visual distribution and switching, correlation coefficient, Manhattan distance, instrument flight.

## REFERENCES

1. **Stolyarov, N.A. and Stolyarov, N.N.** (2016). *Bezopasnost, kontrol parametrov poleta i upravlenie vozдушным судном* [Safety, performance monitoring and aircraft control]. Ulyanovsk: UCAI, 138 p. (in Russian)
2. **Stolyarov, N.A., Kosachevskiy, S.G., Lokaychuk, D.A., Korolev, S.D., Maksimova, V.V., Kalinina, S.A. and Merkulova, A.G.** (2016). *Ekspериментальные исследования распределения и переключения зрительного внимания пилотов самолетов с EFIS* [Experimental Researches of Pilots' Visual Attention Distribution and Switch while Operating EFIS Equipped Aircraft]. *Nauchnyy vestnik UVAU GA* [Scientific herald UHCAS], vol. 8, pp. 50–56. (in Russian)
3. **Mumaw, R.J., Nolic, M.I., Sarter, N.B. and Wickens, C.D.** (2001). *A Simulator Study of Pilots' Monitoring Strategies and Performance on Modern Glass Cockpit Aircraft*. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, vol. 2, no. 45, pp. 73–77. DOI: 10.1177/154193120104500216.
4. **Kocharovskiy, I.B.** (1972). *Raspredelenie i pereklucheniye vnimaniya pri polete po priboram* [Distribution and Switching of Attention during Instrument Flight]. Moscow: Voenizdat, 104 p. (in Russian)
5. **Kuznetsov, I.B.** (2011). *Ekspериментальные исследования зрительной деятельности пилота при пилотировании ВС с электронной системой отображения информации* [Experimental Studies of the Pilot's Visual Activity during Piloting Electronic Flight Instrument System Aircraft]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 172, pp. 122–128. (in Russian)
6. **Kuznetsov, I.B.** (2012). *Metodologiya raspredeleniya vnimaniya pilota* [Methodology of the Pilot's Attention Distribution]. St. Petersburg: Politekhnik, 167 p. (in Russian)
7. **Aydarkin, D.V., Kachan, D.V. and Kosachevskiy, S.G.** (2017). *Razrabotka kriteriev dlya otsenki protsessa formirovaniya navykov pilotirovaniya v khode pervonachalnogo letnogo obucheniya pilotov* [Development of Criteria to Assess the Piloting Skills Formation Process during the Ab-initio Pilot Training]. *Nauchnyy vestnik UIGA* [Scientific herald UCAI], no. 9, pp. 91–97. (in Russian)
8. **Sullivan, M. III.** (2011). *Fundamentals of Statistics*. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 720 p.
9. **Gmurman, V.E.** (2014). *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow: Yurayt, 479 p. (in Russian)
10. **Brandt, S.** (2014). *Data Analysis. Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers*. 4th ed. Springer, 523 p.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey G. Kosachevskiy**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant for Science of the Vice-rector for Academic Affairs and Research of Air Chief Marshall Bugaev Ulyanovsk Civil Aviation Institute, kosach-51@mail.ru.

**Dmitriy V. Aidarkin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Air Chief Marshall Bugaev Ulyanovsk Civil Aviation Institute, aidarkin.dv@yandex.ru.

**Dmitriy V. Kachan**, the Head of Flight Training Centre of Ulyanovsk Civil Aviation Institute, dmitry.k@inbox.ru.

Поступила в редакцию 22.06.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 22.06.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК № 351.814.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-23-32

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОРГАНОВ ОВД НА РУБЕЖАХ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

М.В. КУЛАКОВ<sup>1</sup>, И.А. ЧЕХОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

Вследствие постоянно растущей интенсивности потоков воздушных судов норматив пропускной способности конкретного сектора воздушного пространства достигает своего максимального заданного значения. Более чем 60 % всего воздушного трафика Российской Федерации приходится на московскую воздушную зону, и его интенсивность постоянно растет. Эффективная организация воздушного движения в аэроузловом диспетчерском районе зависит от способности органов обслуживания воздушного движения грамотно согласовывать между собой очередность прибытия и вылета воздушных судов при имеющейся интенсивности воздушного движения, запретах и ограничениях на использование воздушного пространства, метеорологических условиях и иных факторах. В данной статье рассматриваются проблемные аспекты взаимодействия органов обслуживания воздушного движения, приводящие к задержкам вылетающих и заходящих на посадку воздушных судов, влияющие на безопасность, эффективность и регулярность воздушного движения. Описаны принципы организации взаимодействия смежных секторов органов обслуживания воздушного движения, осуществляющих аэродромное диспетчерское обслуживание в Российской Федерации. Приведено описание процесса взаимодействия органов обслуживания воздушного движения аэропорта Остафьево с диспетчерами смежных диспетчерских пунктов. Такими пунктами являются: диспетчерский пункт круга – ДПК Внуково, ДПК Домодедово, вспомогательный диспетчерский пункт подхода – ВДПП Внуково Подход-1 и ВДПП Внуково Подход-2, а также командный диспетчерский пункт государственной авиации. Произведен анализ существующей технологии взаимодействия органов обслуживания воздушного движения, осуществляющих управление воздушным движением в одном аэроузле. Представлены рекомендации, которые при их применении помогут улучшить взаимодействие органов обслуживания воздушного движения на рубежах приема-передачи управления.

**Ключевые слова:** обслуживание воздушного движения, воздушное судно, аэродром, пропускная способность, аэроузел, взаимодействие органов обслуживания воздушного движения.

### ВВЕДЕНИЕ

Технология взаимодействия органов обслуживания воздушного движения (ОВД) определяет перечень обязательных технологических операций для персонала ОВД, предоставляющего районное диспетчерское обслуживание (РДО), диспетчерское обслуживание подхода (ДОП) и аэродромное диспетчерское обслуживание (АДО) при выполнении ими служебных обязанностей в период приема-передачи управления воздушным судном при ОВД.

Взаимодействие между органами ОВД должно обеспечивать оптимальные условия, удовлетворяющие потребности всех пользователей воздушного пространства. Необходимо в полном объеме использовать ресурсы системы УВД и, как следствие, свести к минимуму задержки вылетающих и прилетающих ВС.

### АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОРГАНОВ ОВД НА РУБЕЖАХ ПРИЕМА-ПЕРЕДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Неудовлетворительная организация взаимодействия органов ОВД приводит к задержкам, образованию очередей ВС перед ВПП, на рулежных дорожках (РД) и перроне. Процесс согласования между диспетчерами накладывает свой отпечаток на организацию потоков вылетающих и прилетающих воздушных судов (ВС). При анализе организации потоков ВС в дело

вступает самый важный в авиации фактор – безопасность полетов. Система ОВД непосредственно влияет на безопасность воздушного движения по маршрутам ОВД, в районе аэродрома и районах авиационных работ. Основными причинами авиационных событий по вине системы ОВД являются: неудовлетворительная организация управления воздушным движением и маршрутов ОВД; неудовлетворительное разграничение зон и районов ОВД, воздушного пространства в районе аэродрома (аэроузла); низкий профессиональный уровень специалистов ОВД [1]. В условиях быстроменяющейся воздушной обстановки диспетчеры смежных секторов зависят друг от друга.

Передача осуществляется на рубежах приема-передачи управления. В горизонтальной плоскости это пункты обязательного донесения (ПОД), а если относительно ВС была применена процедура «прямо на», то в момент пересечения рубежей между секторами ОВД. В вертикальной плоскости это установленные высоты. Между ДПП и ДПК рубежом по высоте является, как правило, эшелон 70 (FL 70). Рассмотрим ситуацию, в которой диспетчер диспетчерского пункта подхода (ДПП) передает прилетающие ВС на управление диспетчеру круга. Допустим, диспетчер ДПП не соблюдает технологию взаимодействия или соблюдает ее частично. Переданные на управление диспетчеру круга ВС будут находиться в ситуации, которая без оперативного вмешательства может заведомо перерасти в потенциально-конфликтную (ПКС). Отсюда следует, что воздушная обстановка в секторе круга напрямую зависит от работы диспетчера подхода. Диспетчер подхода практически выполняет работу диспетчера круга по установлению необходимых интервалов для захода на посадку. Даже при плохо организованном потоке заходящих ВС диспетчер круга способен обеспечить необходимый уровень безопасности воздушного движения, но он будет работать на пределе своих возможностей [2–4]. Степень занятости диспетчера принято оценивать в коэффициенте занятости:

$$K_{\text{зан}} = \frac{Z}{\tau},$$

где  $Z$  – это объективно регистрируемые затраты времени на выполнение технических операций при УВД в течение времени наблюдения  $\tau = 60$  мин.

В качестве норматива загрузки диспетчера принят допустимый коэффициент занятости, равный 0,55 [5].

Каждая задержка рейса негативно влияет не только на эффективность, регулярность и безопасность воздушного движения, но и на его экономичность. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) считает улучшение экономического показателя эксплуатации ВС приоритетной задачей. Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA) отмечает рост задержки рейсов более чем в 2 раза. Для авиакомпаний эти задержки вызывают многомиллионные убытки из-за ожидания разрешения на вылет ВС после запуска двигателей. Временное окно (SLOT) в Европе составляет 15 мин, а в отечественных аэропортах – 30 мин, что также влияет на задержки рейсов. ВС должно взлететь в течение установленного времени с момента, указанного в его плане полета. В Европе в случае необходимости данное окно может сокращаться – в течение пяти минут до расчетного времени взлета СТОТ (Calculated Time of Take Off) или в течение десяти минут после СТОТ. Если экипаж ВС не укладывается в отведенное время, то ему необходимо повторно запросить слот.

Развитие отечественной системы организации воздушного движения (ОрВД) планируется осуществлять в соответствии с Глобальной эксплуатационной концепцией ОрВД, будущая система ОрВД должна состоять из семи основных взаимосвязанных компонентов: операции на аэродроме, согласования спроса и пропускной способности, структуризации и организации воздушного пространства, управления конфликтными ситуациями, управления предоставлением

услуг ОрВД, операций пользователей воздушного пространства и синхронизации движения [6]. Надлежащее функционирование данных компонентов тесно связано с управлением данными и информацией, их использованием и передачей.

Управление конфликтными ситуациями планируется осуществлять на трех уровнях: стратегическое управление конфликтными ситуациями в рамках структуризации и организации воздушного движения; согласование спроса, пропускной способности и синхронизации воздушного движения; обеспечение эшелонирования и предупреждение опасных сближений между ВС [4, 7–9].

Под синхронизацией движения понимается тактическое установление и поддержание безопасного, упорядоченного и эффективного потока воздушного движения.

Достижение синхронизированного воздушного движения невозможно без эффективного взаимодействия между органами ОВД. Согласно концепции, основные изменения включают следующее:

- введение динамичного четырехмерного контроля траектории и согласование бесконфликтных траекторий;
- устранение «узких мест»;
- достижение максимальной эффективности использования ВПП благодаря оптимизации процесса установления последовательности движения.

Таким образом, современные технологии взаимодействия органов ОВД должны опираться на бесконфликтные траектории, минимальные временные затраты на согласование, рациональное использование воздушного пространства и оптимизацию процесса определения очередности вылетающих и заходящих на посадку ВС.

На современном этапе развития ГА взаимодействие органов ОВД предполагает улучшение правил взаимодействия, гибкое использование воздушного пространства [3].

Особого внимания требует взаимодействие органов ОВД смежных аэродромов, объединенных в один аэроузел. Аэроузел – это объединение близко расположенных районов аэродромов (вертодромов), которые имеют общие границы и организация выполнения полетов с которых требует согласования и координирования<sup>1</sup>. В узловом диспетчерском районе пропускная способность ВПП любого из отдельно взятых аэродромов этого аэроузла зависит как в частности, так и в целом от взаимодействия всех органов ОВД, предоставляющих АДО, как единого сложного механизма, обеспечивающего необходимый уровень пропускной способности [10].

Пропускная способность ВПП определяется по формуле

$$\mu_{\text{ВПП}} = \frac{1}{T_{\text{ВПП}}},$$

где 1 – планируемое количество ВС в час;

$T_{\text{ВПП}}$  – время занятости воздушным судном ВПП.

Рассмотрим взаимодействие органов ОВД в Московском узловом диспетчерском районе на примере аэропорта Остафьево. Аэропорт Остафьево находится между двумя крупными аэропортами – Внуково и Домодедово. Расстояние от контрольной точки аэродрома (КТА) Остафьево до КТА Внуково 18 км, а до КТА Домодедово 26 км. Аэродром Остафьево является аэродромом совместного базирования. В десяти километрах севернее него расположена запретная зона UUP53-A – город Москва. Взаимодействие органов ОВД затруднено. Зона взлета и посадки (ЗВП) каждого из этих трех аэродромов накладываются друг на друга. Точки соприкосновения различны в зависимости от курса рабочей ВПП каждого из аэродромов соответственно.

<sup>1</sup> Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации: постановление Правительства РФ от 11.03.2010 № 1382010. 25 с.

Взаимное расположение ЗВП Внуково, Остафьево и Домодедово, а также запретной зоны UUP53-A представлены на рис. 1.

Аэропорт Остафьево имеет ВПП длиной 2050 м и шириной 48 м, магнитный курс взлета/посадки  $075^{\circ}/255^{\circ}$ . При работе ВПП 26 диспетчер диспетчерского пункта старта и руления (ДПСР) согласует вылет ВС с диспетчером ДПК Внуково, а при работе ВПП 08 – с ДПК Внуково и ДПК Домодедово. В обоих случаях непосредственно перед выдачей диспетчерского разрешения на вылет (ATC Clearance) экипажу ВС диспетчер ДПСР или объединенного диспетчерского пункта «Вышка» должен уточнить наличие плана полета в системе у диспетчера круга и получить присвоенный код бортового ответчика (Squawk code).

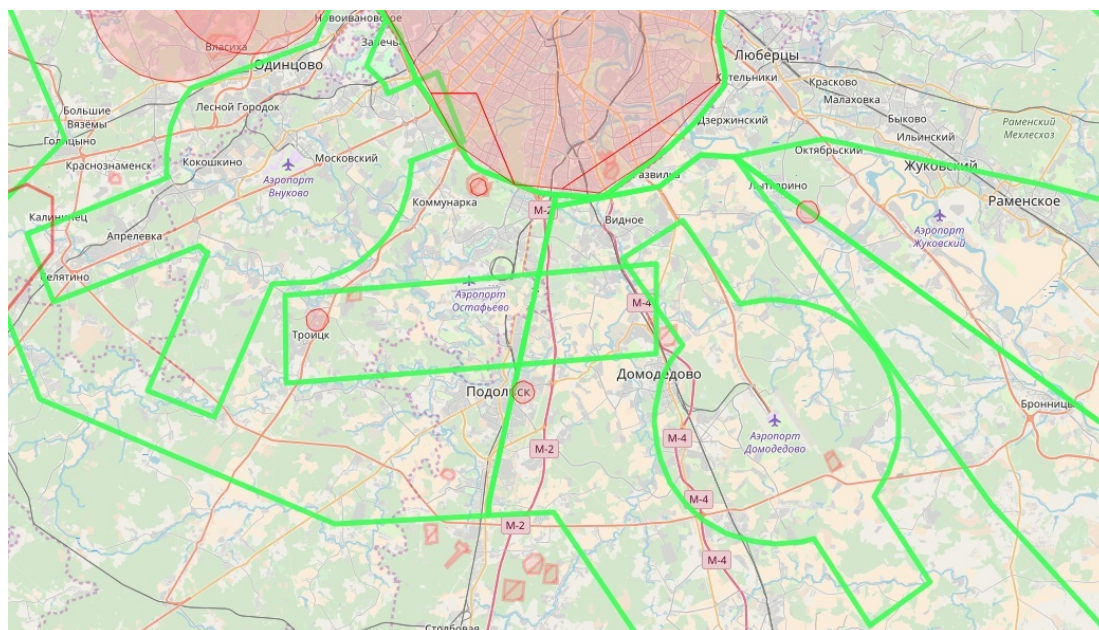


Рис. 1. Карта взаимного расположения аэродромов  
Fig. 1. Map of the mutual location of aerodromes

В процессе руления вылетающего ВС диспетчер аэропорта Остафьево должен согласовать с диспетчером круга смежного аэропорта условия выхода ВС из района аэродрома (высота и курс). При работе с ВПП 08 и в зависимости от точки выхода, проинформировать диспетчера круга Внуково или Домодедово о вылете ВС, не заходящего в его зону. Непосредственно перед взлетом получить разрешение от диспетчера круга на взлет. В случае наличия в данный момент прибывающего вертолета по правилам визуальных полетов (ПВП) требуется одновременное взаимодействие с тремя органами ОВД – ДПК Внуково, ДПК Домодедово и ВДПП Внуково. При производстве полетов ВС государственной авиации требуется дополнительное согласование с РП КДП Остафьево. В связи с использованием для взаимодействия ГГС увеличивается время ожидания разрешения на взлет. Вместе с тем загруженность диспетчеров круга Внуково и Домодедово в часы пик крайне велика, поэтому диспетчеру ДПСР приходится ожидать согласования условий вылета ВС с ними. Подобная система организации согласования негативно влияет на безопасность полетов. Поэтому необходимо усовершенствовать фразеологию, используемую при согласовании между диспетчерами взаимодействующих диспетчерских пунктов, а также необходимо осуществить переход от ГГС к использованию автоматизированной системы согласования, исключающей речевое взаимодействие. Применение процедур по протоколу OLDI (On-Line Data interchange) и CPDLC (Controller-pilot data link communication) поз-

волит решить подобную задачу<sup>2</sup>. Таким образом, минимальные временные затраты на согласование достигаются, во-первых, лаконичной фразеологией взаимодействия органов ОВД, а во-вторых, уходом от согласования по громкоговорящей связи (ГГС) к автоматизированному согласованию.

Рассмотрим несколько потенциально конфликтных и сложных во взаимодействии ситуаций при использовании различных рабочих курсов ВПП.

### ВПП 26 ОСТАФЬЕВО И ВПП 24 (19) ВНУКОВО

Географическая точка (г.т.) OSTIS находится на удалении 3,3 км от торца ВПП 08 Остафьево в месте расположения дальнего приводного радиомаяка (ДПРМ) NW. Географическая точка OSTIS является IAF (Initial approach fix) нескольких схем захода на посадку для аэропорта Внуково. В горизонтальной плоскости точка OSTIS находится в районе аэродрома Остафьево (рис. 2).

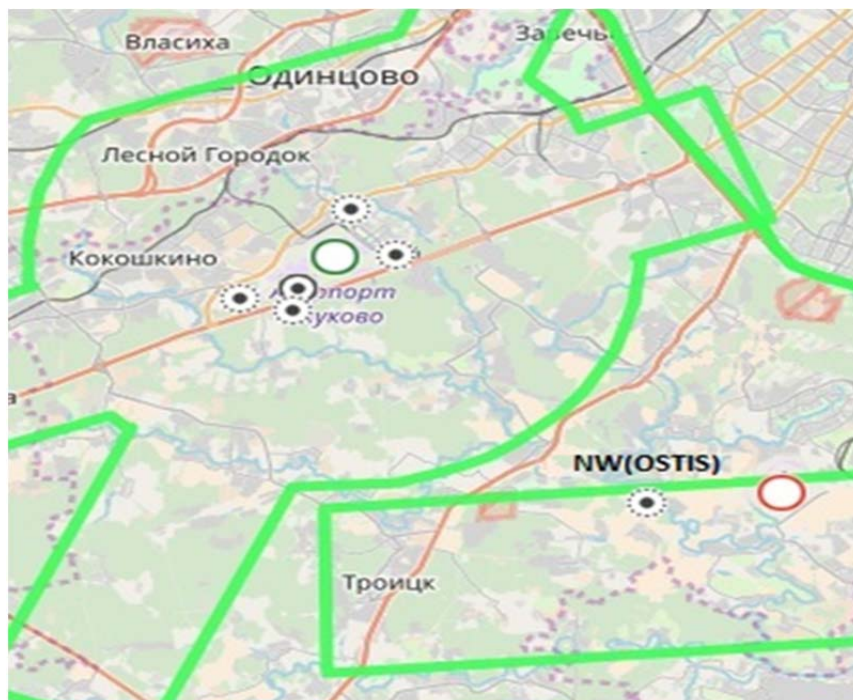


Рис. 2. Географическая точка OSTIS/ДПРМ NW  
Fig. 2. Geographic point OSTIS/ non-directional beacon NW

Прибывающие во Внуково ВС, находящиеся под управлением диспетчера круга, будут проходить г.т. OSTIS на высоте 600 м. Рассмотрим ситуацию, когда из аэропорта Остафьево вылетает ВС. Вследствие преобладающих ветров западного направления часто используется курс ВПП 26. По высоте диспетчер ДПСП (диспетчерский пункт системы посадки) осуществляет УВД до 400 метров включительно. Первоначальная минимальная высота набора высоты для ВС – тоже 400 м. Как правило, ВС достигает данной высоты на удалении 3–4 км от торца ВПП. При условии, что ВС набирает высоту по курсу взлета, оно достигнет высоты 400 м над ДПРМ NW. В соответствии с ФП ИВП минимальное горизонтальное эшелонирование

<sup>2</sup> Eurocontrol standard document for on-line data interchange (OLDI). DPS.ET1.ST06-STD-01-01. Ed. 2.3 [Электронный ресурс] / European organisation for the safety of air navigation. 2001. Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.215.8261&rep=rep1&type=pdf>

при АДО – не менее 5 км. Получается, что при одновременном взлете ВС из аэропорта Остафьево и подходе прибывающего во Внуково ВС к г.т. OSTIS есть вероятность нарушения норм вертикального эшелонирования, которое может составить между ВС менее 300 м. Предупредить подобную ситуацию возможно лишь на основе заблаговременного взаимодействия органов ОВД.

Например, диспетчер ДПК Внуково, имеющий точную информацию от диспетчера ДПСР, создает «окно» между прибывающими ВС или одно из ВС снижает на 900 м вместо 600 м. В точно назначенное и согласованное время ВС взлетает из аэропорта Остафьево. В обоих вариантах правила эшелонирования будут обеспечены.

Диспетчер Остафьево должен также учитывать возможность внезапного выхода на связь экипажа воздушного судна, выполняющего полет по ПВП на высоте до 450 м MSL (Mean sea level). Подобное воздушное движение малой авиации через зону аэродрома никак не отражается на взаимной работе органов ОВД аэроузла, но в случае вылета ВС с курсом взлета  $255^\circ$  создается угроза безопасности полетов. Заход на посадку на ВПП 08 ВС, выполняющего полет по правилам полетов по приборам (ППП), тоже не является исключением, так как г.т. TORSI находится в 3 км от точки входа в глассиду (ТВГ) (рис. 3).

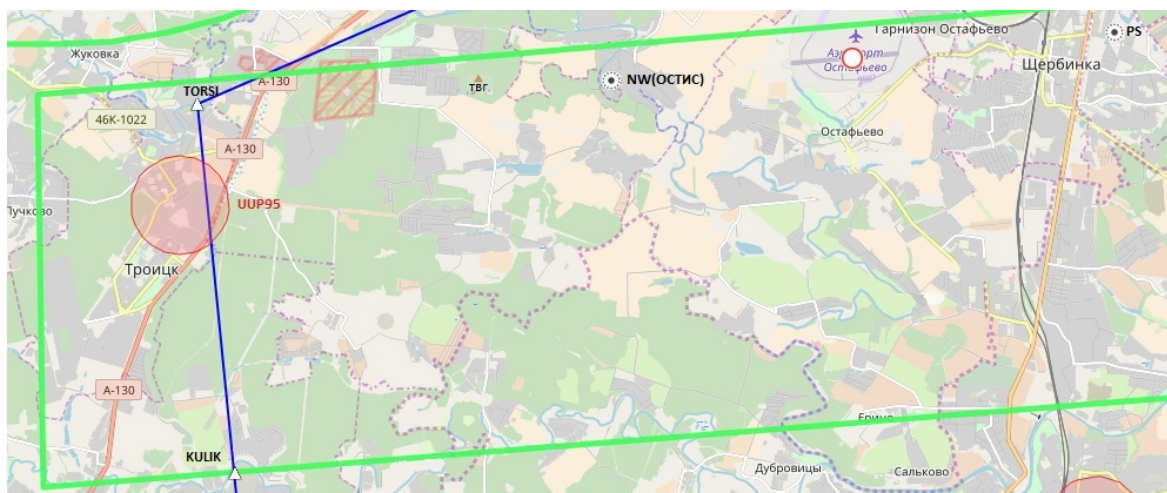


Рис. 3. Западная часть района аэродрома Остафьево  
Fig. 3. The western part of the Ostafyevo Terminal Control Area

Как видно на рис. 3, ситуацию усугубляет запретная зона UUP95 (от уровня земли до 250 м MSL). Воздушным судам малой и сверхлегкой авиации приходится ее обходить восточнее, ближе к ВПП аэропорта Остафьево. Соответственно, требуется оперативное и заблаговременное согласование между органами ОВД ВДПП Внуково-подход 1, Остафьево и Внуково-Круг.

### ВПП 08 ОСТАФЬЕВО И ВПП 14 ПРАВАЯ ДОМОДЕДОВО

При выполнении взлета и посадки с курсом  $75^\circ$  организация взаимодействия между органами ОВД является еще более затруднительной, особенно при работе в аэропорту Домодедово ВПП 14 правая. Рассмотрим порядок взаимодействия при вылете ВС из аэропорта Остафьево в западном направлении. В этом случае маршрут полета будет, как правило, проходить через точку выхода WZ (Каменка). На удалении 4,7 км от торца ВПП 26 Остафьево находится рубеж зон ответственности между ДПК Внуково и ДПК Домодедово (рис. 4). Он же является рубежом между ВДПП Внуково-подход 1 и ВДПП Внуково-подход 2. После взлета ВС будет находиться

в зоне ответственности ДПК Домодедово, что может создать ПКС между потоком ВС, заходящих на посадку и вылетающих из аэропорта Домодедово из-за нарушения правил эшелонирования. Таким образом, диспетчер ДПСР или ДП «Вышка» Остафьево должен:

- заблаговременно согласовать вылет ВС с ДПК Внуково, выдав такие условия вылета, при которых ВС не будет заходить в зону ДПК Домодедово;
- проинформировать диспетчера ДПК Домодедово о том, что в данный момент будет производиться взлет в направлении его зоны, но ВС не будет в нее заходить;
- дать указание экипажу ВС после взлета выполнить разворот таким образом, чтобы не зайти в зону ДПК Домодедово;
- получить от диспетчера ДПК Внуково разрешение на взлет.

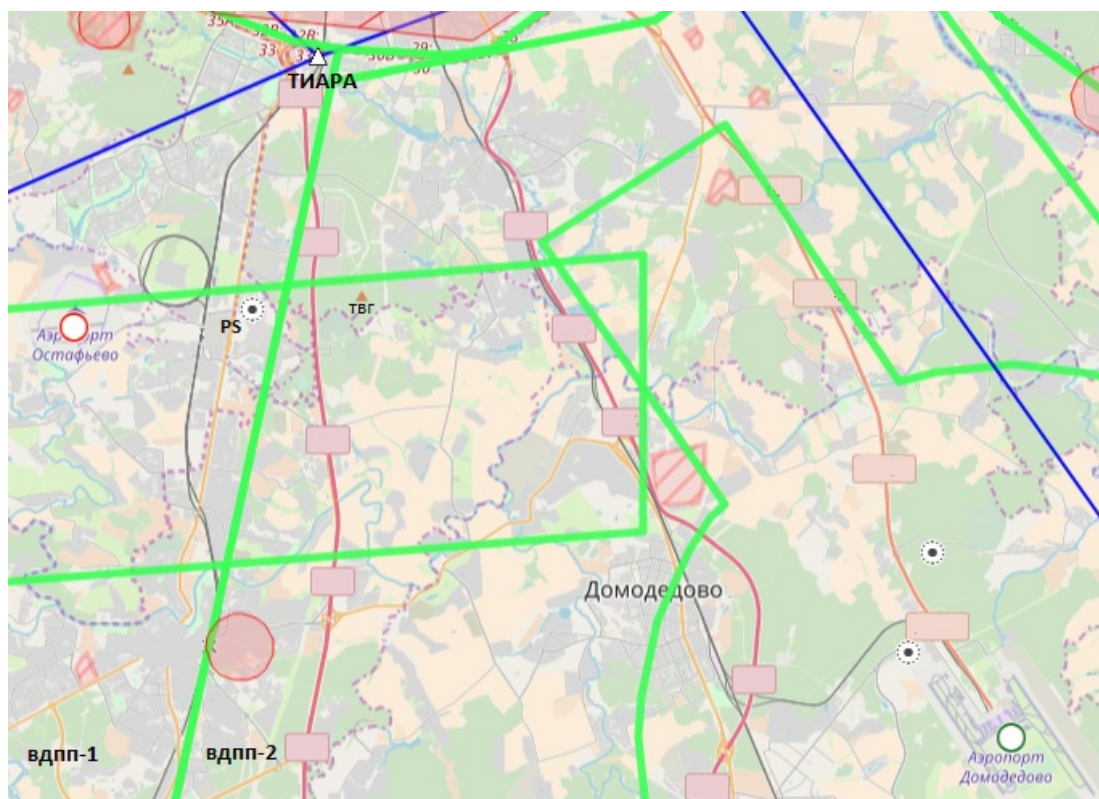


Рис. 4. Восточная часть района аэродрома Остафьево  
Fig. 4. The eastern part of the Ostafyevo Terminal Control Area

Вылет одного ВС требует минимум четырех операций по согласованию со смежными органами ОВД. Диспетчер круга не имеет возможности сразу ответить на вызов по ГГС диспетчеру Остафьево вследствие высокой интенсивности воздушного движения. Необходимо обратить внимание, что диспетчеру Остафьево необходимо убедиться в наличии плана полета у одного из двух ДПК и получить от них код ответчика.

Точка выхода из района аэродрома зависит от пункта назначения и может находиться в зоне ответственности ДПК Домодедово. Процесс согласования в данном случае будет схож с предыдущим с некоторыми изменениями. Информировать о взлете ВС, не заходящего в зону информируемого аэропорта, придется в этом случае диспетчера ДПК Внуково.

Разобранный процесс согласования описывает взаимодействие органов ОВД при одном ВС, находящемся на управлении диспетчера аэропорта Остафьево [11, 12]. Подобная интенсивность воздушного движения бывает крайне редко. Все это позволяет нам ясно увидеть острую необходимость совершенствования технологии взаимодействия органов ОВД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс совершенствования технологии взаимодействия органов ОВД должен осуществляться в таких направлениях, как:

- совершенствование фразеологии, используемой при связи органов ОВД по ГГС;
- переход от речевого к автоматизированному согласованию вопросов взаимодействия;
- разработка и внедрение таких структуры воздушного пространства, рубежей приема-передачи ответственности между органами ОВД, схем прибытия и вылета ВС, а также схем захода на посадку, которые заведомо будут бесконфликтными;
- уведомление органов ОВД смежных секторов плановой информацией, расчетным и фактическим временем (время запуска двигателей ВС, начала руления, прохождения ПОД-в и т. д.) в режиме реального времени;
- стандартизированная технология взаимодействия между органами ОВД узлового диспетчерского района;
- совершенствование отечественной нормативно-правовой базы, регламентирующей взаимодействие органов ОВД аэроузла, органов ОВД гражданской и ведомственной авиации в соответствии с рекомендациями ИКАО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы расследования авиационных событий с факторами организации воздушного движения (ОрВД): монография / под ред. С.А. Сулаева; ОРАП. М.: Авиаиздат, 2015. 435 с.
2. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.
3. **Хашагульгов Р.А.-М., Ходор М.А.** Частная авиация – новая угроза безопасности воздушного движения в России // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7, № 3. С. 22–26.
4. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Метод снижения конфликтности на стандартных маршрутах вылета и прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209(11). С. 117–123.
5. **Скрышник О.Н.** Обеспечение посадки воздушных судов на основе синхронной системы обмена данными // Вестник ИрГТУ. 2009. № 4(40). С. 202–204.
6. **Акзигитов А.Р., Акзигитов Р.А.** Существующая система CNS/ATM: ее структура, недостатки и перспективы развития // Решетневские чтения. 2010. Т. 1, № 14. С. 271–272.
7. **Турков А.Н., Чехов И.А., Нечаев Е.Е.** Вероятностный метод определения пропускной способности в системе УВД // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221(11). С. 148–152.
8. **Исаев В.К., Золотухин В.В.** Построение плоских маневров воздушных судов для обеспечения безопасности воздушного движения // Вестник ННГУ. 2011. № 4(5). С. 2205–2206.
9. **Панферов В.В.** Подходы к решению задач траекторного управления в активной системе организации воздушного движения / А.П. Плясовских, Ю.Е. Хорошавцев, В.В. Купин // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 6(43). С. 64–69.
10. **Реутович Г.А.** Обслуживание воздушного движения: учебное пособие. М.: Институт аэронавигации, 2013.
11. **Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А.** Постановка и решение задачи оперативной коррекции потоков прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–17.
12. **Нечаев Е.Е., Суринт П.С.** Анализ организации воздушного движения на аэродромах с низкой интенсивностью полетов в зарубежных странах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 59–68.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кулаков Михаил Викторович**, аспирант МГТУ ГА, mihail-sev@mail.ru.

**Чехов Игорь Анатольевич**, кандидат военных наук, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, i.chehov@mstuca.aero.

## ANALYSIS OF THE COORDINATION TECHNOLOGY BETWEEN ATC AT THE BOUNDARIES OF CONTROL EXCHANGE

**Mikhail V. Kulakov<sup>1</sup>, Igor A. Chekhov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

Due to the constantly increasing intensity of the air traffic flow, the capacity of a particular sector of airspace reaches its predetermined value. More than 60% of all air traffic of the Russian Federation falls on the Moscow airspace and its intensity is constantly growing. The effective organization of air traffic in an aviation hub control area depends on the ability of air traffic controllers to correctly align the order of arrival and departure of aircraft with the existing traffic intensity, prohibitions and restrictions, meteorological conditions and other factors. This article considers the problematic aspects of the coordination between ATC units, leading to delays in departing and approaching aircraft, affecting the safety, efficiency and regularity of air traffic. The rules of coordination between adjacent ATC sectors, providing aerodrome dispatching service in the Russian Federation are described. The description of the coordination process between the Ostafievo Airport ATCs and the controllers of adjacent dispatch centers is given. These adjacent ATCs are the following: the Vnukovo-Radar, the Domodedovo-Radar, the FIS Vnukovo-1 and the FIS Vnukovo-2, also the ATC Tower of the state aviation. The analysis of the existing technology of ATC coordination in one aviation hub is carried out. Recommendations for improving the effectiveness of the coordination system between ATC units are presented.

**Key words:** Air Traffic Control, aircraft, airfield, capacity, aviation hub, coordination between Air Traffic Controllers.

### REFERENCES

1. *Voprosy rassledovaniya aviatsionnykh sobytii s faktorami organizatsii vozdukhnoy dvizheniya (OrVD)* [Questions of investigation of aviation events with factors of air traffic management (air traffic management)]. *Monografiya* [The monograph] / *Pod red. S.A. Sulaeva; ORAP* [Ed. S.A. Sulaev; ORAP]. Moscow: Aviaizdat, 2015. 435 p. (in Russian)
2. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozdukhnyim dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p. (in Russian)
3. **Khashagulgov, R.A.-M. and Khodor, M.A.** (2015). *Chastnaya aviatsiya – novaya ugroza bezopasnosti vozdukhnoy dvizheniya v Rossii* [Private aviation is a new threat to air traffic safety in Russia]. *H&ES Research*, vol. 7, no. 3, pp. 22–26. (in Russian)
4. **Malygin, V.B. and Nechaev, E.E.** (2014). *Metod snizheniya konfliktnosti na standartnikh marshrutakh vleta i pribitiya* [Method of reducing conflicts on standard departure and arrival routes]. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, vol. 11, no. 209, pp. 117– 123 p. (in Russian)
5. **Skrypnik, O.N.** (2009). *Obespechenie posadki vozdukhnykh sudov na osnove sinkhronnoy sistemy obmena dannymi* [Securing of aircraft landing based on synchronous system of data exchange]. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 4, no. 40, pp. 202–204. (in Russian)

6. Akzigitov, A.R. and Akzigitov, R.A. (2010). *Sushchestvuyushchaya sistema CNS/ATM: ee struktura, nedostatki i perspektivy razvitiya* [CNS/ATM system: its structure, drawbacks and future development]. Reshetnevskie chteniya, vol. 1, no. 14, pp. 271–272. (in Russian)
7. Turkov, A.N., Chekhov, I.A. and Nechaev, E.E. (2015). *Veroyatnostnyy metod opredeleniya propusknoy sposobnosti v sisteme UVD* [Probabilistic method to determine the capacity of the ATC system]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 148–152. (in Russian)
8. Isaev, V.K. and Zolotukhin, V.V. (2011). *Postroenie ploskikh manevrov vozdushnykh sudov dlya obespecheniya bezopasnosti vozdushnogo dvizheniya* [Construction of plane maneuvers of aircraft for air traffic safety]. Vestnik NNGU, vol. 4, no. 5, pp. 2205–2206. (in Russian)
9. Panferov, V.V., Plyasovskikh, A.P., Khoroshavtsev, YU.E. and Kupin, V.V. (2012). *Podkhody k resheniyu zadach traektornogo upravleniya v aktivnoy sisteme organizatsii vozdushnogo dvizheniya* [Approaches to solving trajectory management tasks in active air traffic management system]. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation], vol. 6, no. 43, pp. 64–69. (in Russian)
10. Reutovich, G.A. (2013). *Obsluzhivanie vozdushnogo dvizheniya* [Service of air traffic]. Uchebnoe posobie [Manual]. Moscow: Institut aeronavigatsii. (in Russian)
11. Lebedev, G.N., Malygin, V.B. and Mikhaylin, D.A. (2017). *Postanovka i reshenie zadachi operativnoy korrektsii potokov prileta i vyleta vozdushnykh sudov v rayone aerodroma s pomoshchyu geneticheskogo algoritma* [Problem setting and solution of the response correction of arrival and departure of air traffic flow in the vicinity of the field by means of the genetic algorithm]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 8–7. (in Russian)
12. Nechaev, E.E. and Surint, P.S. (2017). *Analiz organizatsii vozdushnogo dvizheniya na aerodromakh s nizkoy intensivnostyu poletov v zarubezhnykh stranakh* [Analysis of air traffic control management at airports with low flight intensity in foreign countries]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 59–68. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mikhail V. Kulakov**, Post-graduate student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mihail-sev@mail.ru.

**Igor A. Chekhov**, Candidate of National Defense Sciences, Associate Professor of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, i.chehov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 16.03.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 16.03.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-33-42

## МЕТОДИКА ПОДДЕРЖАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ПОТОКА ПРИБЫТИЯ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ПОСТОЯННОГО СНИЖЕНИЯ

В.Б. МАЛЫГИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-08-00070

В статье рассматривается методика построения стандартных маршрутов прибытия с использованием профиля постоянного снижения (CDO) в воздушном пространстве зоны «подхода» с повышенной интенсивностью воздушного движения. Методика расчета эффективных значений элементов структуры воздушного пространства основана на вероятностных характеристиках потока прибытия, на основе которых итерационным способом определяются необходимые рабочие площади «тромбона» и «веера» в целях поддержания режима полета при постоянном снижении. В качестве результата применения указанной методики представлена примерная структура из трех стандартных маршрутов прилета в аэропорт Шереметьево, в которой на конечных участках маршрута прибытия применены «тромбоны». Расчет вероятностных характеристик беспriorитетного функционирования «тромбона» («веера») произведен исходя из пуассоновского закона потока поступления воздушных судов (ВС) на каждый маршрут и равномерного распределения случайной величины попадания ВС всех маршрутов на элементарный их общий участок (I). Проведена сравнительная оценка эффективности схем «тромбона» и «веера» по рабочей площади на основе характеристик потока движения воздушных судов. Получен существенный результат по преимуществу схемы типа «тромбон» не только относительно эффективности использования воздушного пространства, но и по характеристикам целостности прилетного потока воздушных судов, необходимого для применения CDO. Полученные результаты подтверждены проведенным моделированием в рамках условий задачи. В заключение статьи обозначены условия практического обеспечения режима постоянного снижения на участках CDO стандартных маршрутов прилета, в том числе при превышении расчетной интенсивности воздушного движения, предложены меры по минимизации отрицательных последствий от подобных возмущений прилетного потока.

**Ключевые слова:** полет в режиме постоянного снижения (CDO), безопасность полета, стандартный маршрут прибытия (STAR).

### ВВЕДЕНИЕ

Выполнение полета в режиме постоянного снижения (CDO) требует ряда существенных ограничений для управления воздушным движением. В этой связи требуется проектирование стандартных маршрутов с CDO с учетом комплекса таких ограничений [3, 4]. Прежде всего это касается характеристик интенсивности воздушного движения (ИВД). В работах [1, 5] предлагается эффективный способ вероятностного учета часовой ИВД как на отдельном маршруте, так и по структуре воздушного пространства в целом.

По сути, происходит адаптация проекта структуры воздушного пространства (ВП) к существующей на практике интенсивности воздушного движения (ВД) [6, 8]. Так, каждый STAR проекта имеет собственную характеристику допустимой ИВД ( $\Psi_i^{CDO}$ ), которая не должна превышать. При этом сумма ИВД всех STAR не должна превышать характеристику максимальной часовой интенсивности воздушного пространства в целом  $N_{(ВП)}$ .

$$\Psi_{(ВП)} = \begin{cases} \Psi_i^{CDO} \leq \Psi_{(ВП)} \\ \sum_1^i \Psi_i^{CDO} \leq \Psi_{(ВП)} \end{cases} \quad (1)$$

Условие (1) является обязательным для организации CDO, но не достаточным. На практике ИВД довольно часто превышает допустимую ИВД, которая, как правило, рассчитана без учета необходимости применения CDO. Для группы STAR, представляющих структуру прилета на конкретный аэродром, допустимая ИВД рассчитывается на общих участках. Такими участками могут быть либо «тромбон», либо «веер».

Рассмотрим условия нормального функционирования этих общих участков структуры при беспriorитетном обслуживании воздушного движения. На практике особое требование предъявляется к площади рабочих зон «тромбона»  $S^{тр}$  и «веера»  $S^B$  (рис. 1) [1].

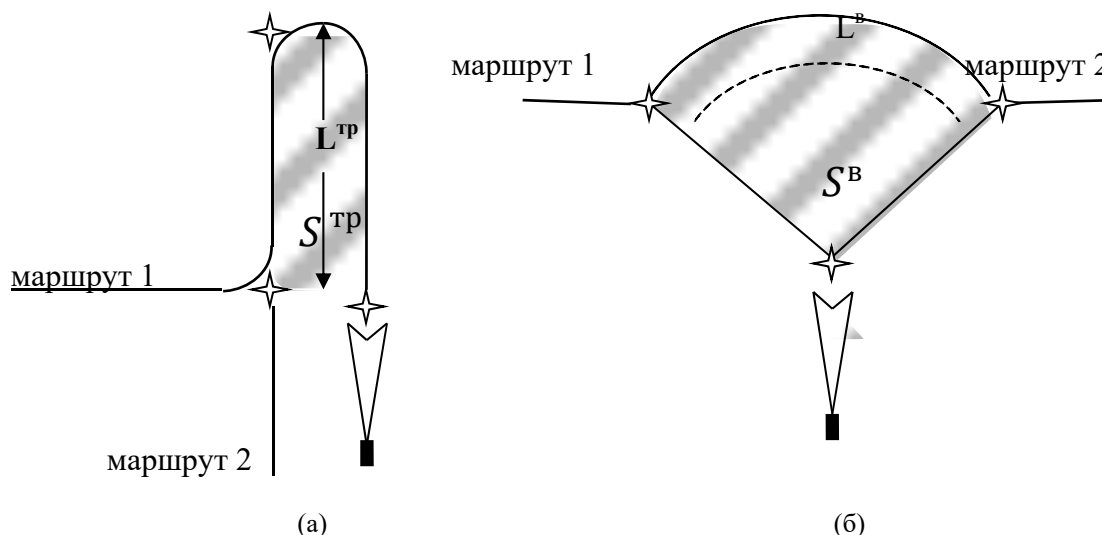


Рис. 1. Рабочие площади «тромбона» (а) и «веера» (б)  
Fig. 1. Working areas of “trombone” and “point merge”

Задача определения характеристик нормального функционирования  $S^{тр}$  и  $S^B$ , каждая из которых состоит минимум из двух участков, сводится к минимизации площади этих зон [2] при условии выполнения заданного объема или интенсивности потока движения воздушных судов. Условие обеспечения безопасности полетов учитывается при помощи соблюдения интервала в 10 км между любой парой ВС, что задано в виде константы. Целостность потока ВС рассматривается как узкопрофессиональное понятие, предполагающее упорядочение движения, при котором каждому ВС соответствует единственный элементарный участок  $\ell$ , равный величине интервала. Общеупотребительным значением данного термина является способность системы выполнять свои функции при изменении параметров внешней среды. В данном случае изменяющейся внешней средой рассматривается часовая интенсивность воздушного движения, предельные значения которой не должны нарушать способность системы выполнять свои функции.

Методика расчета максимальной длины очереди на «тромбоне» представлена в [1–3].

Характеризуя минимальные размеры рабочей площади «тромбона», исходим из условия накопления очереди. Так, очередь на «тромбоне» будет определяться:

$$\Omega_{тр} = 2 \frac{N}{\ell}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество ВС, поступающих на «тромбон» в пределах элементарного участка  $\ell$ .

По условию задачи на участке  $\ell$  каждого маршрута не может быть более одного ВС. Следовательно, увеличение очереди на «тромбоне» зависит от количества маршрутов при-

бытия  $K$ , встроенных в «тромбон», и плотности потока ВС на каждом из них  $\xi_{(i)}$ . Вероятность  $P_K$  наступления отказа в обслуживании ВС на «тромбоне» определяется как наступление события, где в течение  $K$  интервалов  $\ell$  на «тромбон» будет поступать более двух ВС в каждом интервале.

Рассмотрим характеристики минимизации рабочей площади на примере использования «тромбона» в структуре воздушного пространства, похожего на Московский узловой диспетчерский район (МУДР) для а/д Шереметьево. На рис. 2 в реальном масштабе представлена структура маршрутов прибытия с трех направлений. Каждый маршрут имеет участок, который может быть использован для CDO, и участок типа «тромбон», сопряженный с подобным участком другого маршрута в целях поддержания целостности прилетного потока.

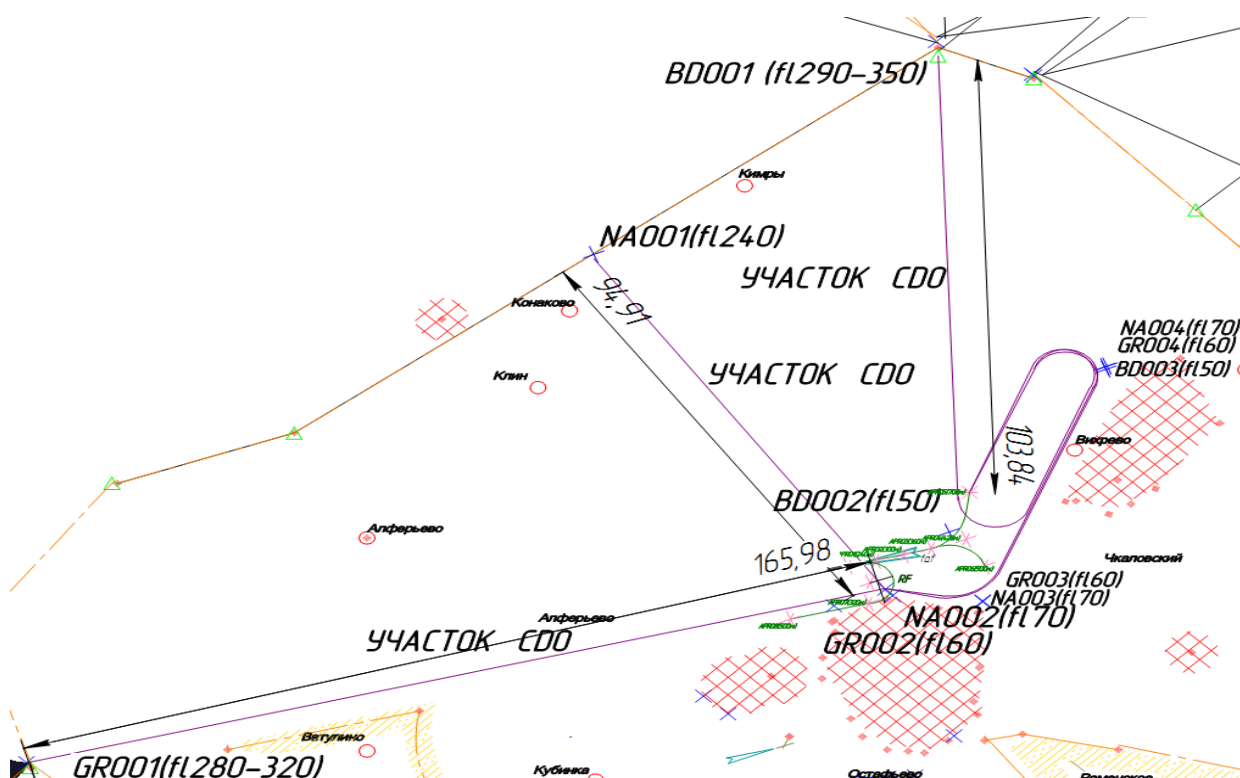


Рис. 2. Пример схемы маршрутов  
Fig. 2. Example of the area

Для того чтобы объявить участки (BD001-BD002; GR001-GR002; NA001-NA002 (рис. 2)) стандартных маршрутов прибытия пригодными для применения CDO [8], необходимо провести коррекцию расчетов каждого такого маршрута. Главным отличием участка маршрута прибытия, пригодного для использования CDO, от традиционного, аналогичного участка является отсутствие ограничений по поступательной скорости. Действительно, пилот самостоятельно должен иметь возможность установить скоростной режим, наиболее благоприятный для конкретных условий полета с учетом особенностей типа и веса ВС [10]. Данное обстоятельство является существенным ограничением для обслуживания воздушного движения, т. к. на втором месте после поддержания безопасных интервалов между ВС за счет разницы высот полета стоит метод регулирования скорости. При отсутствии такой возможности, авиадиспетчеру потребуется повышенный интервал на участке CDO. Это обязательно повлияет на пропускную способность воздушного пространства, которое в данном случае определяется пределом ИВД «тромбона».

Согласно методике [1]  $\Psi_i^{CDO}$  определяется как максимальная часовая ИВД, при которой наступление события переполнения участка маршрута рассматривается как маловероятное событие. Каждый такой CDO-участок имеет собственную длину (Уч. 1 – 94,91 км; Уч. 2 – 165,98 км; Уч. 3 – 103,84 км (рис. 2)). При условии пуассоновского поступления потока ВС и равномерного его распределения по маршрутам при средней путевой скорости ВС 500 км/ч имеем:

- среднее время нахождения ВС на участках:  $T_{ср}^1 = 11$  мин;  $T_{ср}^2 = 20$  мин;  $T_{ср}^3 = 12,5$  мин;
- предельное (условное) количество ВС на участках:  $\eta_{max}^1 = 9$ ;  $\eta_{max}^2 = 16$ ;  $\eta_{max}^3 = 10$ ;
- параметры  $\lambda_{(1)} = 5,42$ ;  $\lambda_{(2)} = 10,83$ ;  $\lambda_{(3)} = 6,16$  закона Пуассона для каждого участка при условии 5 % вероятности переполнения участка;
- допустимая часовая интенсивность каждого участка:  $\Psi_1^{CDO} = 29$  ВС/ч;  $\Psi_2^{CDO} = 31$  ВС/ч;  $\Psi_3^{CDO} = 30$  ВС/ч.

Таблица 1  
Table 1

Характер вероятностного распределения случайной величины количества ВС  
на n-м маршруте

The nature of the probability distribution of the random quantity of aircraft on the  $n$ -th route

| $\lambda_{(k)}/n$ | 0           | 1          | 2         | 3          | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       | 17       | 18       | 19       | 20       |
|-------------------|-------------|------------|-----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $P\lambda_{(1)}$  | 0,004427147 | 0,02399513 | 0,0650268 | 0,11748178 | 0,159188 | 0,17256  | 0,155879 | 0,120695 | 0,081771 | 0,049244 | 0,02669  | 0,013151 | 0,00594  | 0,002476 | 0,000959 | 0,000346 | 0,000117 | 3,74E-05 | 1,13E-05 | 3,21E-06 | 8,71E-07 |
| $P\lambda_{(2)}$  | 1,9796E-05  | 0,0002144  | 0,001161  | 0,00419107 | 0,011347 | 0,024578 | 0,044364 | 0,068637 | 0,092918 | 0,111811 | 0,121091 | 0,11922  | 0,107596 | 0,089636 | 0,06934  | 0,050063 | 0,033886 | 0,021588 | 0,012989 | 0,007403 | 0,004009 |
| $P\lambda_{(3)}$  | 0,00211225  | 0,01301148 | 0,0400754 | 0,08228807 | 0,126724 | 0,156124 | 0,160287 | 0,141052 | 0,10861  | 0,074338 | 0,045792 | 0,025644 | 0,013164 | 0,006238 | 0,002745 | 0,001127 | 0,000434 | 0,000157 | 5,38E-05 | 1,74E-05 | 5,37E-06 |

Характер вероятностного распределения случайной величины количества ВС на маршруте ( $n$ ) представлен в табл. 1, где по горизонтали приведены вероятности нахождения на маршруте соответственно от 0 до 20 ВС. По данным табл. 1 определим вероятность попадания ВС на элементарный участок  $\ell$  на каждом маршруте с учетом равномерного распределения случайной величины. Данные представлены в табл. 2.

Перемножив значения вероятностей попадания  $n$  ВС на элементарный участок  $\ell$ , получим характеристику потока для трех маршрутов (рис. 3). Как видно из рис. 3, максимальное значение эта вероятность принимает при  $n = 7$  ВС.

Это однозначно указывает на условие образования очереди на «тромбоне» на первой итерации (3).

$$\Omega_{тр}^1 > 1. \quad (3)$$

Таблица 2  
Table 2

Вероятность попадания ВС на элементарный участок  $\ell$  для каждого маршрута  
The probability of an aircraft falling on an elementary segment  $\ell$  for each route

| $\ell_{(K)}/n$ | 0           | 1          | 2         | 3           | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       | 17       | 18       | 19       | 20       |
|----------------|-------------|------------|-----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $P\ell_{(1)}$  | 0,004427147 | 0,00119976 | 0,0065027 | 0,017622267 | 0,031838 | 0,04314  | 0,046764 | 0,042243 | 0,032708 | 0,02216  | 0,013345 | 0,007233 | 0,003564 | 0,00161  | 0,000671 | 0,00026  | 9,39E-05 | 3,18E-05 | 1,01E-05 | 3,05E-06 | 8,71E-07 |
| $P\ell_{(2)}$  | 1,9796E-05  | 1,072E-05  | 0,0001161 | 0,00062866  | 0,002269 | 0,006145 | 0,013309 | 0,024023 | 0,037167 | 0,050315 | 0,060546 | 0,065571 | 0,064557 | 0,058263 | 0,048538 | 0,037547 | 0,027109 | 0,01835  | 0,01169  | 0,007033 | 0,004009 |
| $P\ell_{(3)}$  | 0,00211225  | 0,00065057 | 0,0040075 | 0,012343211 | 0,025345 | 0,039031 | 0,048086 | 0,049368 | 0,043444 | 0,033452 | 0,022896 | 0,014104 | 0,007898 | 0,004054 | 0,001921 | 0,000845 | 0,000347 | 0,000134 | 4,84E-05 | 1,66E-05 | 5,37E-06 |



Рис. 3. Вероятностное распределение случайной величины нахождения n ВС на элементарном участке  $\ell$  на первой итерации

Fig. 3. Probabilistic distribution of the random value of n aircraft location on the elementary segment  $\ell$  at the first iteration

На второй итерации необходимо учесть значения  $\lambda^1_{(i)}$  в  $\Psi_i^{CDO-1}$  и повторить вычисления  
 –  $\Psi_1^{CDO-2} = 23,58$ ;  $\Psi_2^{CDO-2} = 20,17$ ;  $\Psi_3^{CDO-2} = 23,84$ ;  
 –  $\lambda^2_{(1)} = 4,32$ ;  $\lambda^2_{(2)} = 6,72$ ;  $\lambda^2_{(3)} = 4,96$ .

На рис. 4 представлена вероятностная характеристика на второй итерации задачи. Из рис. 4 видно, что наиболее вероятное значение количества ВС на участке снизилось до пяти. Итерационным путем определяем длину участка стабилизации на «тромбоне». В результате расчетов на 6-й итерации рост очереди прекратился, а с 9-й итерации очередь начала уменьшаться. В целом для погашения очереди с учетом (3) понадобилось 15 итераций.

Результаты расчетов показывают, что при суммарной ИВД = 90 ВС/час рабочая площадь «тромбона»  $S^{TP}$  для трех маршрутов прибытия (рис. 2) с учетом (2), (3) и ширины «тромбона» 10 км составляет не более 750 км<sup>2</sup>.



Рис. 4. Вероятностное распределение случайной величины нахождения  $n$  ВС на элементарном участке  $\ell$  на второй итерации

Fig. 4. Probabilistic distribution of the random value of  $n$  aircraft location on the elementary segment  $\ell$  at the second iteration

Методика расчета вероятностных характеристик обслуживания самолетов на схеме типа «веер» сводится к определению потребной длины дуги ( $L^B$ ) и радиуса ( $R^B$ ). Длина дуги «веера» должна позволять погасить образовавшуюся очередь, т. е. по результатам решения задачи:

- $L^B = 150$  км;
- $R^B = \frac{L^B 180}{\pi \theta}$ , где  $\theta = 120^\circ$  (наиболее удобный угол разворота «веера»);
- $S^B = 0,5 L^B R^B = 0,5 \cdot 150 \cdot 71,65 = 5374$  км<sup>2</sup>.

Данный результат соответствует условию построения участков стандартных маршрутов на дуге «веера» с одной стороны, для попутных потоков. На классической схеме эти участки строятся с двух сторон, и потоки движения воздушных судов следуют навстречу друг другу. Следовательно, по аналогии с «тромбоном» в этом случае длина дуги «веера» для двух встречных маршрутов равна половине расчетной.

- $L^B = 75$  км;
- $R^B = \frac{L^B 180}{\pi \theta}$ , где  $\theta = 120^\circ$  (наиболее удобный угол разворота «веера»);
- $S^B = \pi (R^B)^2 \theta / 360 = 0,5 \cdot 75 \cdot 35,85 = 1344$  км<sup>2</sup>.

Для иллюстрации данной ситуации проведем имитацию моделирования [7, 9] поступления потока воздушных судов на односторонний и классический «веера». По условиям вероятностного распределения в момент  $t_1$  на «веер» поступает 7 ВС, в момент  $t_2$  – 5 ВС, в момент  $t_3$  – 3 ВС, в момент  $t_4$  – 1 ВС, в качестве математического ожидания. Всего за 4 отрезка времени поступило 16 ВС. В табл. 3 представлено моделирование освобождения дуги «веера» из  $L^i$  участков при одностороннем движении ВС (левая часть) и классическом – встречном движении ВС (правая часть) при условии, что первоначально «веер» свободен от ВС.

**Таблица 3**  
**Table 3**

Имитация модели освобождения очереди на «веере» при попутном и встречном направлениях движения воздушных судов  
Simulation of the queue release model on the "point merge" for the same and opposite direction traffic

| Т\Л      | Одностороннее направление движения ВС на дуге «веера» |          |          |          |          |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  | Встречное движение ВС на дуге «веера» |          |          |          |          |          |          |
|----------|-------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | $\ell^1$                                              | $\ell^2$ | $\ell^3$ | $\ell^4$ | $\ell^5$ | $\ell^6$ | $\ell^7$ | $\ell^8$ | $\ell^9$ | $\ell^{10}$ | $\ell^{11}$ | $\ell^{12}$ | $\ell^{13}$ | $\ell^{14}$ |  | $\ell^1$                              | $\ell^2$ | $\ell^3$ | $\ell^4$ | $\ell^5$ | $\ell^6$ | $\ell^7$ |
| $t_1$    | 7                                                     |          |          |          |          |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  | 4                                     |          |          |          |          |          |          |
| $t_2$    | 5                                                     | 6        |          |          |          |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  |                                       |          |          |          |          |          | 3        |
| $t_3$    | 3                                                     | 5        | 5        |          |          |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  | 2                                     | 3        |          |          |          |          |          |
| $t_4$    | 1                                                     | 3        | 5        | 4        |          |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  |                                       |          |          |          |          | 2        | 3        |
| $t_5$    |                                                       | 1        | 3        | 5        | 3        |          |          |          |          |             |             |             |             |             |  | 2                                     | 2        | 2        |          |          |          |          |
| $t_6$    |                                                       |          | 1        | 3        | 5        | 2        |          |          |          |             |             |             |             |             |  |                                       |          |          | 1        | 1        | 3        | 1        |
| $t_7$    |                                                       |          |          | 1        | 3        | 5        | 1        |          |          |             |             |             |             |             |  | 1                                     | 2        | 2        | 1        |          |          |          |
| $t_8$    |                                                       |          |          |          | 1        | 3        | 5        | 0        |          |             |             |             |             |             |  |                                       |          |          | 0        | 3        | 1        |          |
| $t_9$    |                                                       |          |          |          |          | 1        | 3        | 4        |          |             |             |             |             |             |  |                                       | 1        | 2        | 2        | 0        |          |          |
| $t_{10}$ |                                                       |          |          |          |          |          | 1        | 3        | 3        |             |             |             |             |             |  |                                       |          |          | 2        | 1        |          |          |
| $t_{11}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          | 1        | 3        | 2           |             |             |             |             |  |                                       |          | 1        | 2        | 1        |          |          |
| $t_{12}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          | 1        | 3           | 1           |             |             |             |  |                                       |          |          | 1        | 1        |          |          |
| $t_{13}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          |          | 1           | 3           | 0           |             |             |  |                                       |          |          | 1        | 2        | 0        |          |
| $t_{14}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          |          |             | 1           | 2           |             |             |  |                                       | 0        | 1        |          |          |          |          |
| $t_{15}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          |          |             |             | 1           | 1           |             |  |                                       |          |          |          | 1        | 1        |          |
| $t_{16}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          |          |             |             |             | 1           | 0           |  | 0                                     | 1        |          |          |          |          |          |
| $t_{17}$ |                                                       |          |          |          |          |          |          |          |          |             |             |             |             | 0           |  |                                       |          |          |          |          | 1        |          |

Из правой части таблицы видно, что 16 ВС поступают в момент  $t_1$  – с левой стороны «веера» 4 ВС, с правой 3 ВС, в момент  $t_2$  – с левой стороны 2 ВС, с правой стороны 3 ВС, в момент  $t_3$  – с левой стороны 2 ВС, с правой 1 ВС, в момент  $t_4$  – 1 ВС с правой стороны. Из таблицы видно, что и в обоих случаях возмущение потока ВС гасится за 17 итераций, но во втором случае требуется в два раза меньше элементарных участков на дуге «веера».

Расчеты показывают, что схема типа «тромбон» значительно эффективнее (в 7 раз) схемы типа «веер» с углом разворота  $\theta = 120^\circ$  при попутном направлении потока движения ВС на дуге, и в 1,8 раза при классической схеме организации движения потока прилетных ВС на «веере». В то же время за счет применения радиуса в качестве линии пути для движения ВС и разворота на угол  $90^\circ$  (в отличие от «тромбона», где угол разворота равен  $180^\circ$ ) средняя длина маршрута задержки на «веере» будет меньше, чем на «тромбоне».

В выводах необходимо отметить, что практическое обеспечение режима постоянного снижения потребует увеличения участка  $\ell$  на участках CDO стандартных маршрутов прилета, что обязательно скажется на предельной часовой интенсивности воздушного движения. При превышении расчетной ИВД потребуются организация маршрутов alpha и bravo, совмещенных друг с другом по горизонтали для обеспечения целостности прилетного потока. Для «тромбона» эта задача будет сведена к построению участков CDO друг над другом с соблюдением вертикального эшелонирования. При этом длина «тромбона» на маршрутах bravo увеличится на расчетную величину. На схеме типа «веер» организовать маршруты bravo без нарушения целостности потока не представляется возможным.

Данная методика носит универсальный характер и справедлива для любых типов стандартных маршрутов прибытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с. С. 37–92.
2. **Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б.** Способ упорядочения потока движения ВС по типу «тромбон» с обратным расположением полезной зоны маневрирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 138–143.
3. **Чехов И.А., Чехов О.И.** Алгоритм формирования динамической очереди БПЛА при заходе на посадку // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 25–30.
4. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Метод снижения конфликтности на стандартных маршрутах вылета и прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 117–123.
5. **Турков А.Н., Чехов И.А., Нечаев Е.Е.** Вероятностный метод определения пропускной способности в системе УВД // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 148–152.
6. **Пятко С.Г.** Повышение эффективности управления воздушным движением в Московской зоне ЕС ОрВД [Электронный ресурс] // Aviation explorer. Режим доступа: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (дата обращения: 22.12.2017).
7. **Людомир А.В., Орлов В.С.** Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве // Прикладная информатика. 2014. № 5(53). С. 89–97.
8. **Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х.** Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 94–114.
9. **Обухов Ю.В.** Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов / А.С. Попов, В.С. Орлов, А.О. Котова // Труды МАИ. 2015. № 81. С. 1–4.
10. **Ozlem S.M.** Optimum arrival routes for flight efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. № 3. С. 449–452.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Малыгин Вячеслав Борисович**, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, mbv898@ya.ru.

## METHODOLOGY OF MAINTENANCE OF ARRIVAL FLOW INTEGRITY BASED ON THE CHARACTERISTICS OF THE PERMANENT REDUCTION MODE

Vyacheslav B. Malygin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research,  
grant № 16-08-00070

### ABSTRACT

The article deals with the technique of constructing standard arrival routes using the CDO profile in the airspace of the "approach" zone with increased air traffic intensity. The methodology for calculating the effective values of airspace structure elements is based on the probabilistic characteristics of the arrival flow, on the basis of which the required working areas of the «trombone» and «point merge» are determined in an iterative way in order to maintain the CDO regime. As a result of the application of this technique, an exemplary structure is presented from three standard arrival routes for Sheremetyevo Airport, in which trombones are used on the final sections of the arrival route. The calculation of the probabilistic characteristics of the unimportant functioning of a «trombone» («point merge») is made proceeding from the Poisson law of the arrival flow of the aircraft for each route and the uniform distribution of the random value of the aircraft entry of all routes to an elementary common segment (I). A comparative evaluation of the efficiency of the «trombone» and «point merge» circuits on the working area is made on the basis of the characteristics of the aircraft traffic flow. An important result is obtained, mainly on the «trombone» type, not only on the efficiency of airspace use, but also on the integrity characteristics of the aircraft arrival required for CDO. The obtained results are confirmed by the simulation carried out under the conditions of the problem. In conclusion, the conditions for the practical provision of a constant reduction regime at CDO sections of the standard arrival routes are presented, which includes the exceedance of the calculated ATM, and measures are proposed to minimize the negative consequences from such disturbances of the incoming flow.

**Key words:** flight in constant decent operation (CDO), flight safety, standard arrival route (STAR).

### REFERENCES

1. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozдушным движением. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p., pp. 37–92. (in Russian)
2. **Lebedev, G.N. and Malygin, V.B.** (2015). *Sposob uporyadocheniya potoka dvizheniya VS po tipu «trombon» s obratnym raspolozheniem poleznoi zoni manevrirovaniya* [A way to streamline the flow of aircraft in the type of «trombone» with the reverse location of the useful maneuvering area]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 138–143. (in Russian)
3. **Chekhov, I.A. and Chekhov, O.I.** (2017). *Algoritm formirovaniya dinamicheskoy ocheredi BPLA pri zakhode na posadku* [Algorithm for the formation of a dynamic queue of UAVs at the approach]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 25–30. (in Russian)
4. **Malygin, V.B. and Nechaev, E.E.** (2014). *Metod snizheniya konfliktnosti na standart-nikh marshrutakh vyleta i pribytiya* [Method of conflict resolution on standard departure and arrival routes]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 117–123. (in Russian)
5. **Turkov, A.N., Chekhov, I.A. and Nechaev, E.E.** (2015). *Veroyatnostnyy metod opredeleniya propusknoy sposobnosti v sisteme UVD* [Probabilistic method for determining the capacity in

the ATC system]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 148–152. (in Russian)

6. **Pyatko, S.G.** (2017). *Povishenie effektivnosti upravleniya vozdushnim dvizheniem v Moskovskoy zone ES OrVD* [Improving the efficiency of air traffic management in Moscow zone of the ATM]. Aviation explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (available at: 22.12.2017). (in Russian)

7. **Lyudomir, A.V. and Orlov, V.S.** (2014). *Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskoy vozduшной обстановки v upravlyaemom vozduшном prostranstve* [Simulation modeling of dynamic air conditions in controlled airspace]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], vol. 5, no. 53, pp. 89–97. (in Russian)

8. **Zolotukhin, V.V., Isaev, V.K. and Davidson, B.Kh.** (2009). *Nekotorye aktualnye zadachi upravleniya vozduшnym dvizheniem* [Some actual problems of air traffic control]. Proceedings of MIPT, vol. 1, no. 3. pp. 94–114. (in Russian)

9. **Obukhov, Yu.V., Popov, A.S., Orlov, V.S. and Kotova, A.O.** (2015). *Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki bezopasnosti poletov* [Application of simulation modeling for flight safety assessment]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], no. 81, pp. 1–4. (in Russian)

10. **Ozlem, S.M.** (2015). *Optimalnie marshruty pribytiya dlya povisheniya effektivnosti* [Optimum arrival routes for flight efficiency]. Journal of Power and Energy Engineering, no. 3, pp. 449–452.

#### INFORMATION ABOUT AUTHOR

**Vyacheslav B. Malygin**, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [mbv898@ya.ru](mailto:mbv898@ya.ru).

Поступила в редакцию 16.03.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 16.03.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55

## СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ АЭРОПОРТА В УСЛОВИЯХ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК

А.О. НИКУЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Международный аэропорт Шереметьево, г. Москва, Россия*

В статье представлен анализ функционирования системы совместного принятия решений (A-CDM) аэропорта Шереметьево при работе аэропорта в час пик. Отечественные и международные программы развития организации воздушного движения (ОрВД) предполагают, что аэропорты будут полностью включены в сеть ОрВД как узлы этой сети. Будет использоваться кооперативное принятие решений, чтобы обеспечить «бесшовный» процесс планирования. Этот процесс будет проходить с участием пользователей воздушного пространства, поставщиков аэронавигационного обслуживания и аэропортов (с использованием автоматизированных средств управления прилетом, вылетом и движением по поверхности аэродрома) в интересах управления очередями для увеличения пропускной способности взлетно-посадочной полосы (ВПП). Оборудование ВПП должно быть усовершенствовано, уменьшены нормы эшелонирования между воздушными судами (ВС) на прилете и вылете, должны работать современные средства навигации и управления движением по поверхности аэродрома. ВПП относится к ресурсам, которые работают по принципу обслуживания только одного клиента. Влияние погодных условий (мокрая ВПП, сильный ветер, низкая видимость) определяют пропускную способность аэродрома. Управление прилетом и вылетом позволяет оптимизировать работу аэродрома с точки зрения стоимостной эффективности и экологии. Система совместного принятия решений для аэропорта – это комплекс процедур, направленных на повышение уровня организации потоков воздушного движения, пропускной способности аэродрома и воздушного пространства за счет повышения уровня предсказуемости событий и оптимизации процесса использования ресурсов. Система позволяет управлять информацией с целью получения модифицированных выходных данных для принятия решения. Основные задачи системы – повышение уровня временной точности возникновения события, а также его предсказуемости.

**Ключевые слова:** система совместного принятия решений аэропорта (A-CDM), сложные погодные условия, аэропорт.

### ВВЕДЕНИЕ

Услуги авиаперевозок должны предоставляться в максимальном объеме именно тогда, когда они более всего востребованы пассажирами, что соответственно приводит к неравномерному распределению рейсов по часам суток. Авиаперевозчики формируют расписание на основании анализа спроса на воздушные перевозки, информации о режиме работы аэропорта, ограничений работы аэропорта по шуму, проведения ремонтных работ и/или технологических перерывов, а также нормативов технической возможности объектов инфраструктуры аэропорта. Спрос на воздушные перевозки во многом зависит от часовых поясов и режима работы аэропортов вылета и назначения. Соответственно, данные факторы и являются основополагающими по возникновению пиков максимального спроса в определенные периоды года, определенные дни недели и определенные часы [1, 2].

### ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОК В ЧАС ПИК В АЭРОПОРТУ

Час пик определяется количеством запланированных (обслуженных) рейсов, которое соответствует или приближается к показателям нормативов технической возможности объектов инфраструктуры аэропорта. На формирование часа пик также огромное влияние оказывает объем перевозок базовых авиакомпаний по отношению к объемам небазовых.

На рис. 1, 2 представлены структуры формирования часов пик в аэропорту Шереметьево. Утренний час пик формируется за счет наложения европейского потока на рейсы по внутренним воздушным линиям (ВВЛ), а вечерний – за счет добавления юго-восточных направлений.

На рис. 3–5 представлена структура формирования часов пик по потокам (прилет/вылет) и направлениям.

Основными факторами, влияющими на расширение границ часа пик, являются отклонения от плановых временных величин операций, определяющих статусы рейса. Причинами возникновения отклонений могут являться: вводимые ограничения на использование воздушного пространства, метеорологические условия, задержки в аэропорту вылета, задержки по маршруту полета, задержки по отправлению ВС в аэропорт назначения и т. д.

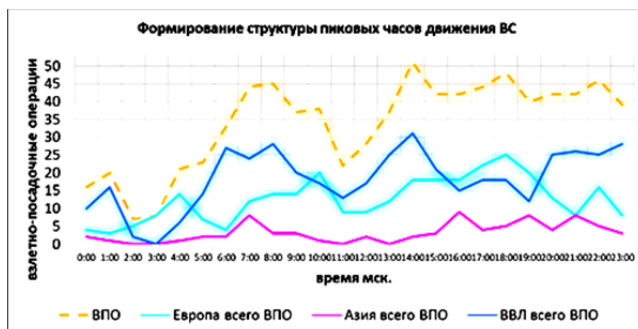


Рис. 1. Структура час пик по направлениям  
Fig. 1. Structure "rush hour" on the directions

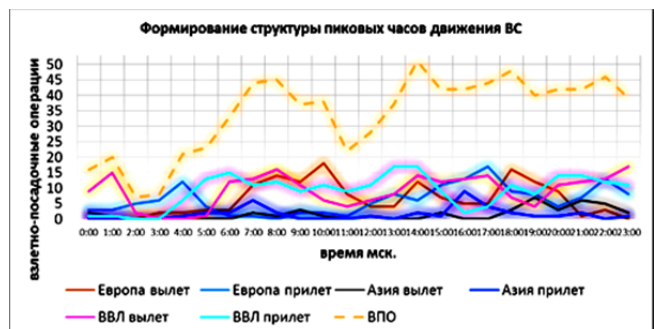


Рис. 2. Структура час пик по потокам (прилет/вылет)  
Fig. 2. Structure "rush hour" on flows (arrival/departure)

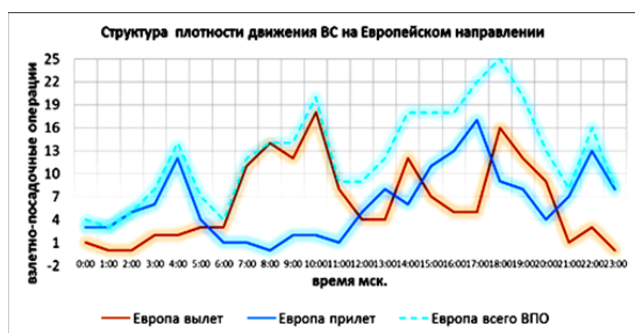


Рис. 3. Структура час пик рейсов европейского направления  
Fig. 3. Structure "rush hour" of flights European direction



Рис. 4. Структура час пик рейсов юго-восточного направления  
Fig. 4. Structure "rush hour" of flights Southeast direction

Если на временной параметр отдельной операции влияет конкретное условие, то обычно создается цепной эффект и для других параметров, которые пострадают вследствие этого. В большинстве случаев косвенное влияние на параметры планирования настолько же велико, как и прямое. Например, если время посадки рейса задержано, изменено место стоянки ВС и/или изменено время продолжительности противообледенительной защиты ВС, то, как правило, будут изменены целевые времена отправления ВС (TOBT) и взлета (TTOT).

Зависимости между временными параметрами:

- $EIBT (Estimated\ In\ Block\ Time)_i = ELDT (Estimated\ Landing\ Time)_i + EXIT (Estimated\ Taxi\ In\ Time)_i$  (если  $ELDT$  и/или  $EXIT$  изменяют значения, то  $EIBT$  тоже изменяется);

- $TOBT_i = EIBT_i + MTTT_i + EDIT_i$  (если  $MTTT$  и/или  $EDIT$  изменяют значения, то и  $TOBT$  изменяется);
- $TOBT_i = AIBT_i + MTTT_i + EDIT_i$  (если  $MTTT$  и/или  $EDIT$  изменяют значения, то и  $TOBT$  изменяется).

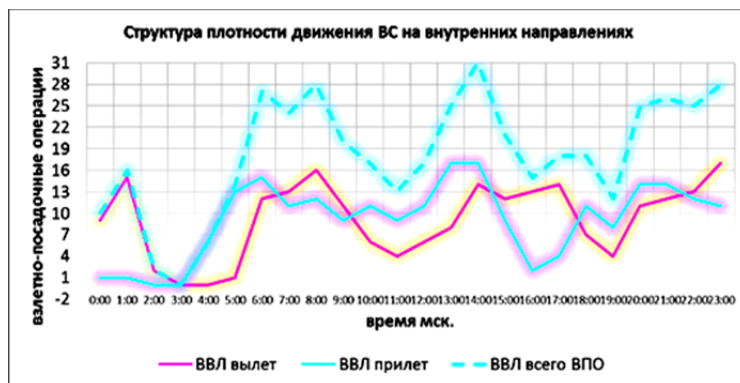


Рис. 5. Структура час пик рейсов по ВВЛ  
Fig. 5. Structure "rush hour" of flights on domestic airlines

Причинная зависимость вызвана фактическими событиями, которые влияют на будущие события из-за задержек выполнения определенных операций. На рис. 6 показано, как изменение условий (ливневые осадки, туман и т. д.) может привести к задержке нескольких параметров и необходимости корректировки целевого времени подтверждения запуска двигателей (TSAT) на основании назначенных времен отправления и взлета (TTOT/ETOT и TOBT).

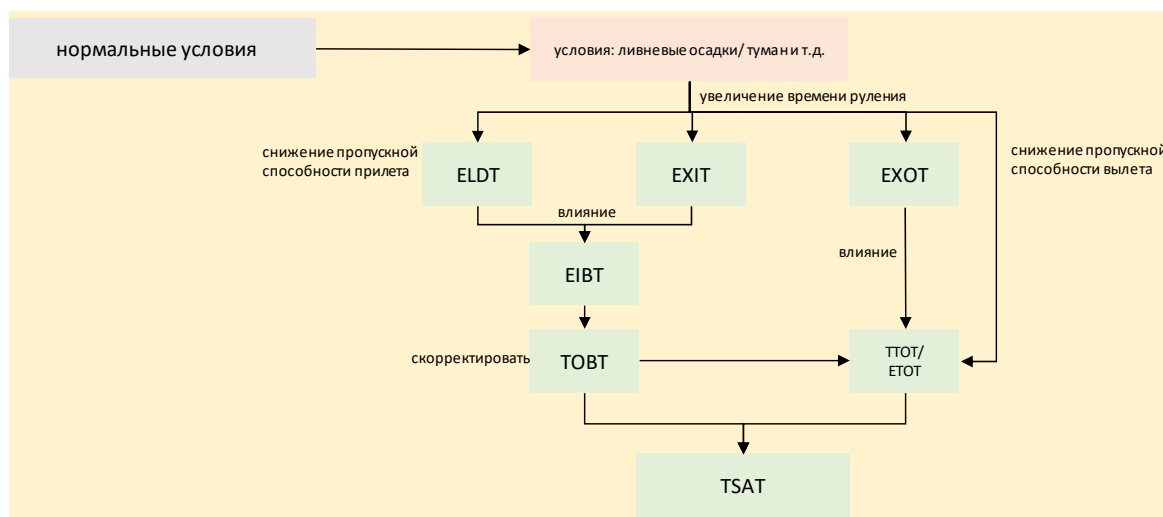


Рис. 6. Взаимная зависимость временных параметров в условиях тумана  
Fig. 6. Mutual dependence of time parameters in fog conditions

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО УСТРАНЕНИЮ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК

Основные причины возникновения пиковых нагрузок прогнозируемы на разных этапах планирования и обслуживания рейсов. В целях повышения согласованности действий при прогнозировании достижения предельных значений объемов воздушного движения относительно

заявленной пропускной способности специалистами аэропорта Шереметьево, операторами по наземному обслуживанию, авиакомпаниями и ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (ГК ОрВД) разработана «Методика действия должностных лиц при ограничениях пропускной способности в международном аэропорту Шереметьево».

В соответствии с «Соглашением об информационном обмене между ФГУП "Госкорпорация по ОрВД" и АО "МАШ" при реализации концепции совместного принятия решений (А-СДМ) в аэропорту Шереметьево» внедряется информационный обмен данными на этапах стратегического, предтактического и тактического планирования использования воздушного пространства между центральной аэропортовой базой данных АО «МАШ» (ЦАБД «Синхрон») и комплексом средств автоматизации планирования использования воздушного пространства Главного центра Единой системы организации воздушного движения (КСА ПИВП ГЦ ЕС ОрВД).

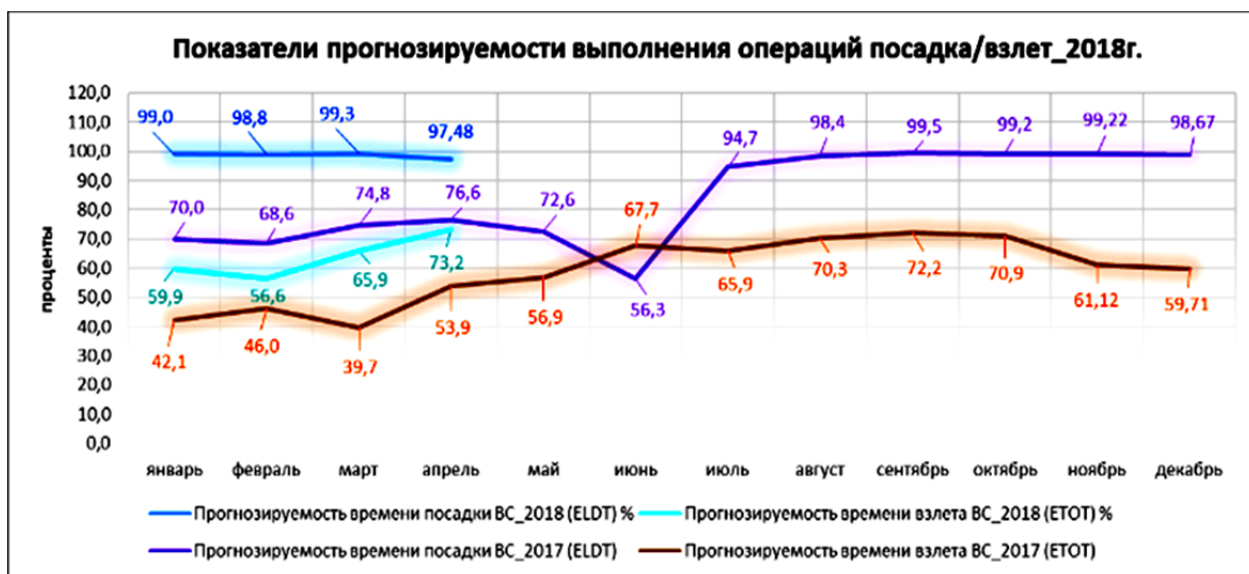
На стратегическом этапе планирования полетов выявляются конфликтные ситуации между спросом и технической возможностью в часы пик, которые корректируются путем согласования изменений графиков движения ВС между аэропортом, авиакомпанией и ФГУП ГК ОрВД. Эффективно сформированное расписание движения ВС составляет не менее 50 % успеха в выполнении суточных планов полетов в аэропорту.

На предтактическом и тактическом этапах планирования полетов при поступлении информации о корректировке планов полетов анализируются значения пропускной способности объектов инфраструктуры аэропорта и при необходимости назначаются новые слоты для рейсов, отклоняющихся от первоначального графика движения ВС. Для применения тактических мер разработаны сценарии по определению пропускной способности комплекса ИВПП при наступлении определенных событий по ограничению доступности инфраструктуры или метеорологических условий.

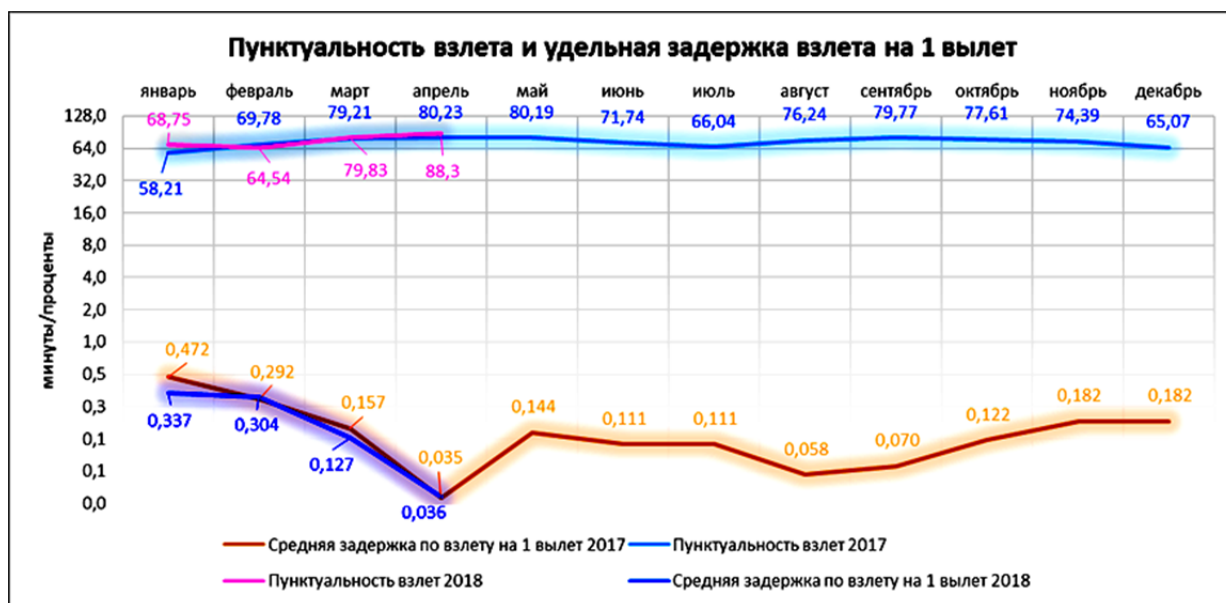
Совместная с ПАО «Аэрофлот» и ФГУП ГК ОрВД разработка и реализация стратегических, предтактических и тактических мер по координации суточного плана полетов в аэропорту Шереметьево и плана использования воздушного пространства обеспечивает стабильное выполнение запланированных операций в часы высокой интенсивности полетов. Применение информационных и регулирующих мер направлено на поддержание безопасных и упорядоченных потоков воздушного движения, а также на гибкое управление пропускной способностью аэропорта.

В целях оптимизации процессов обмена информацией о статусах рейсов и полетах, с марта по июнь 2017 года специалистами АО «МАШ» и ООО «НИТА» проделана комплексная работа по отладке и тестированию сопряжения ИТ-платформы А-СДМ (ЦАБД «Синхрон») и КСА УВД «Альфа» из состава РК «Москва-Резерв» в части сопряжения и обмена данными. Внедренные мероприятия базируются на документах EUROCONTROL "Specification for ATS Data Exchange Presentation (ADEXP) Edition 3.1", ED-145 и обеспечивают техническую возможность реализации процедур AMAN/DMAN. Результаты внедрения представлены на рис. 7.

Если рассматривать процесс обмена информацией между аэропортом и центрами ОВД/ОрВД, то при поступлении модифицированных данных из аэропорта о плановом времени отправления ВС, индивидуализированном времени руления и расчетном времени взлета, центр ОВД/ОрВД, проанализировав планируемую и фактическую воздушную обстановку, может назначить слот для использования воздушного пространства (СТОТ – Calculated Take Off Time), который в процессе изменения воздушной обстановки корректируется с учетом высвободившихся слотов (ТТОТ – Target Take Off Time). После этого в ИТ-платформе аэропорта запустится обратный процесс вычисления планового времени отправления ВС и заданного времени подтверждения запуска двигателей, которое будет доставлено пилоту на борт ВС и всем партнерам. Реализация данных процедур позволяет сократить время руления, расход авиатоплива и задержки взлета ВС. Показатели пунктуальности взлета удельной задержки взлета ВС приведены на рис. 8.



**Рис. 7.** Показатели точности данных прогнозируемых времен посадки и взлета ВС  
**Fig. 7.** Indicators of the data accuracy of the predicted aircraft landing and take-off times



**Рис. 8.** Показатели пунктуальности взлета и удельной задержки взлета ВС  
**Fig. 8.** Indicators of punctuality of take-off and specific aircraft take-off delay

За счет своевременного обмена точными данными о прогнозируемых временах выполнения статусных операций всеми участниками процесса наземного обслуживания и достигается повышение пунктуальности отправления и взлета, что соответственно оказывает влияние на сокращение количества задержанных рейсов.

Основные процессы A-CDM в аэропорту Шереметьево запускаются с момента поступления данных о расчетном времени посадки ВС. При поступлении точных данных о расчетном времени посадки ВС в IT-платформу A-CDM информация обрабатывается и распространяется всем партнерам для планирования своих операций и предоставления обратной связи по модифицированным временам. От расчетного времени посадки ВС, с учетом индивидуализированного времени руления, вычисляется время прибытия ВС на стоянку. Определяется технологи-

ческое время наземного обслуживания ВС и плановое время отправления ВС с места стоянки. С учетом индивидуализированного времени руления ВС на вылет от планового времени отправления ВС с места стоянки вычисляется расчетное время взлета с учетом эшелонирования на ВПП, которое распространяется всем партнерам для планирования своих операций. Детализация показателей представлена на рис. 9, 10.

Следовательно, работоспособность системы совместного принятия решений зависит от:

- своевременного обмена расширенной и точной информацией о фактическом и прогнозируемом времени выполнения операции, обрабатываемой и распространяемой IT-платформой A-CDM между всеми партнерами;

- заранее согласованных всеми партнерами процедур, технологий и инструкций по порядку действий при наступлении определенного события.

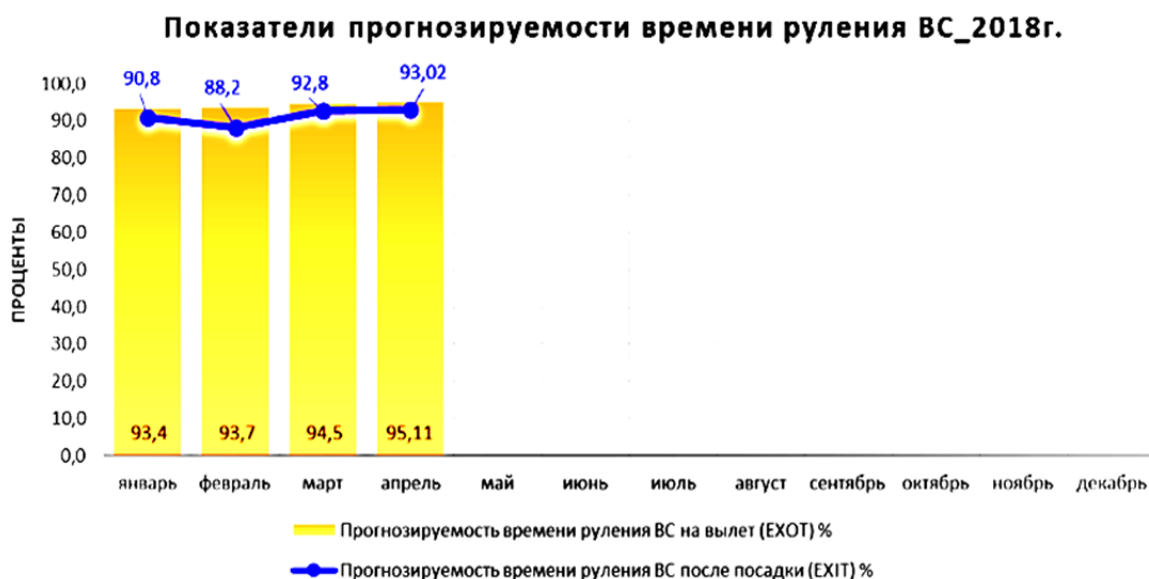


Рис. 9. Точность прогнозируемого времени руления ВС  
Fig. 9. The accuracy of the predicted time of aircraft taxiing

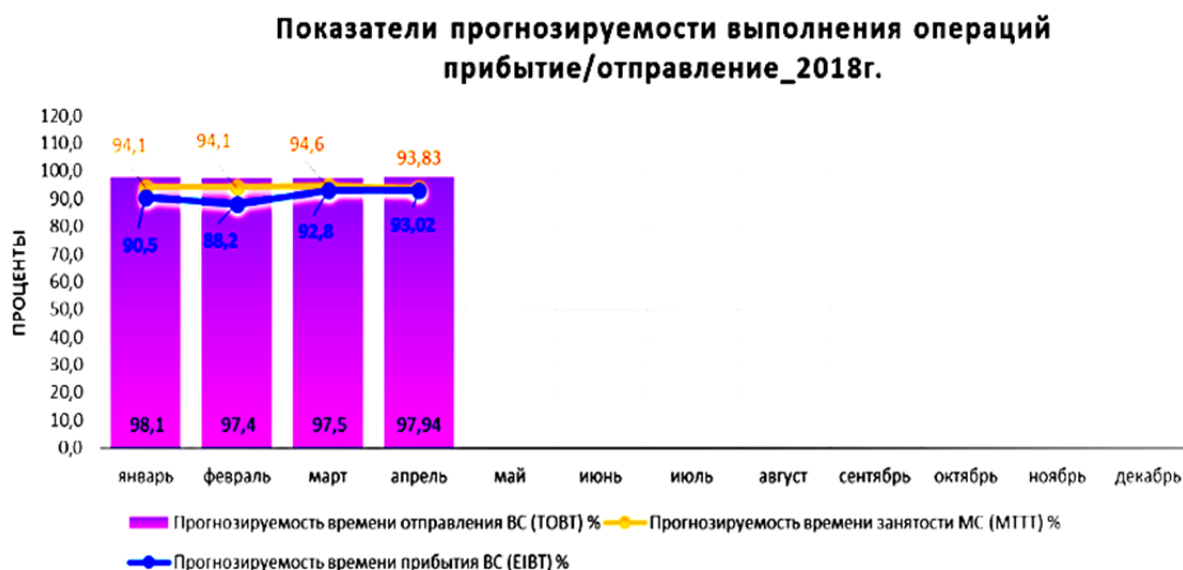


Рис. 10. Точность данных прогнозируемого времени прибытия, занятости мест стоянок (МС) и отправления ВС  
Fig. 10. Accuracy of the data of the predicted aircraft arrival and departure time, taking parking places (PP)

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРТНЕРОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ДВИЖЕНИЯ ВС

При прогнозировании превышения пропускной способности аэродрома, на брифингах и/или телефонных конференциях, проводимых между Центром управления аэропортом Шереметьево, хаб-контролем и операционным центром ПАО «Аэрофлот» и Шереметьевским центром ОВД, определяются сценарии работы и процедуры для приведения заявленной интенсивности движения ВС к фактической пропускной способности аэродрома.

В целях исключения скопления ВС на предварительном старте применяется процедура «отложенного запуска двигателей», но более эффективно себя зарекомендовала внедряемая процедура «ввод интервалов на вылет», которая обеспечивает назначение нового слота для взлета с учетом установленного интервала между операциями. От назначенного слота для взлета с учетом индивидуализированного времени руления вычисляется время отправления и запуска двигателей, которое распространяется между всеми партнерами и доставляется на борт ВС через ACARS.

При прогнозировании превышения пропускной способности перронов на телефонных конференциях согласовывается порядок формирования потоков ВС по схеме два взлета/одна посадка.

В целях повышения интенсивности движения ВС в час пик обеспечивается выполнение процедуры «сокращенные минимумы эшелонирования» (СМЭ) на ИВПП для режимов «взлет – посадка», «взлет – взлет», «посадка – посадка» и дополнительно применяется процедура использования двух ИВПП в режиме «посадка – посадка» в период массового прилета и в режиме «взлет – взлет» в период массового вылета.

Для обеспечения формирования сбалансированного потока вылетающих ВС обеспечивается соблюдение согласованных условий:

- ВС должно покинуть место стоянки не позднее чем через 1 минуту после получения разрешения от диспетчера «Шереметьево-Перрон» на буксировку и запуск двигателей;
- на точке запуска двигателей КВС обязан прослушивать радиообмен, а при задержке более 5 минут (без проведения процедуры противообледенительной обработки ВС) должен проинформировать диспетчера «Шереметьево-Перрон» о причине и времени задержки;
- ВС на исполнительном старте должно начать разбег не позднее чем через 10 секунд после получения разрешения;
- для выполнения операций в режиме «взлет – взлет» устанавливается значение интервалов 2,5 км при применении процедуры СМЭ;
- время на освобождение ВПП приземлившимся ВС должно составлять не более 80 секунд.

Взаимодействие между партнерами по системе совместного принятия решений в аэропорту Шереметьево осуществляется на базе IT-платформы А-СДМ ЦАБД «Синхрон». Интерфейс суточного плана полетов в ЦАБД «Синхрон» для прилетающих рейсов (рис. 11) предоставляет партнерам по А-СДМ модифицированную информацию о статусе прилетающих рейсов, местоположении, расчетном и фактическом времени посадки и прибытия на МС. Расчетное время посадки (ELDT) постоянно обновляется от момента входа в Московскую зону до финального захода на посадку. Эти данные позволяют обслуживающим операторам более точно спрогнозировать распределение ресурсов для обслуживания прилетающего рейса и определить скорректированное время отправления ВС с места стоянки, если фактическое время прибытия ВС (EIBT) отличается от времени по расписанию (SIBT). Эксплуатанты ВС могут заблаговременно скорректировать ротацию ВС и спрогнозировать время отправления ВС при ожидании групп трансферных пассажиров.

Если расчетное время прибытия ВС раньше времени по расписанию (рис. 12), то в стрипе прилетного рейса отображается информация о занятости места стоянки, что позволяет диспетчеру, ответственному за распределение МС, своевременно назначить новое место стоянки непунктуально прибывающему рейсу и проинформировать всех партнеров по А-СДМ.

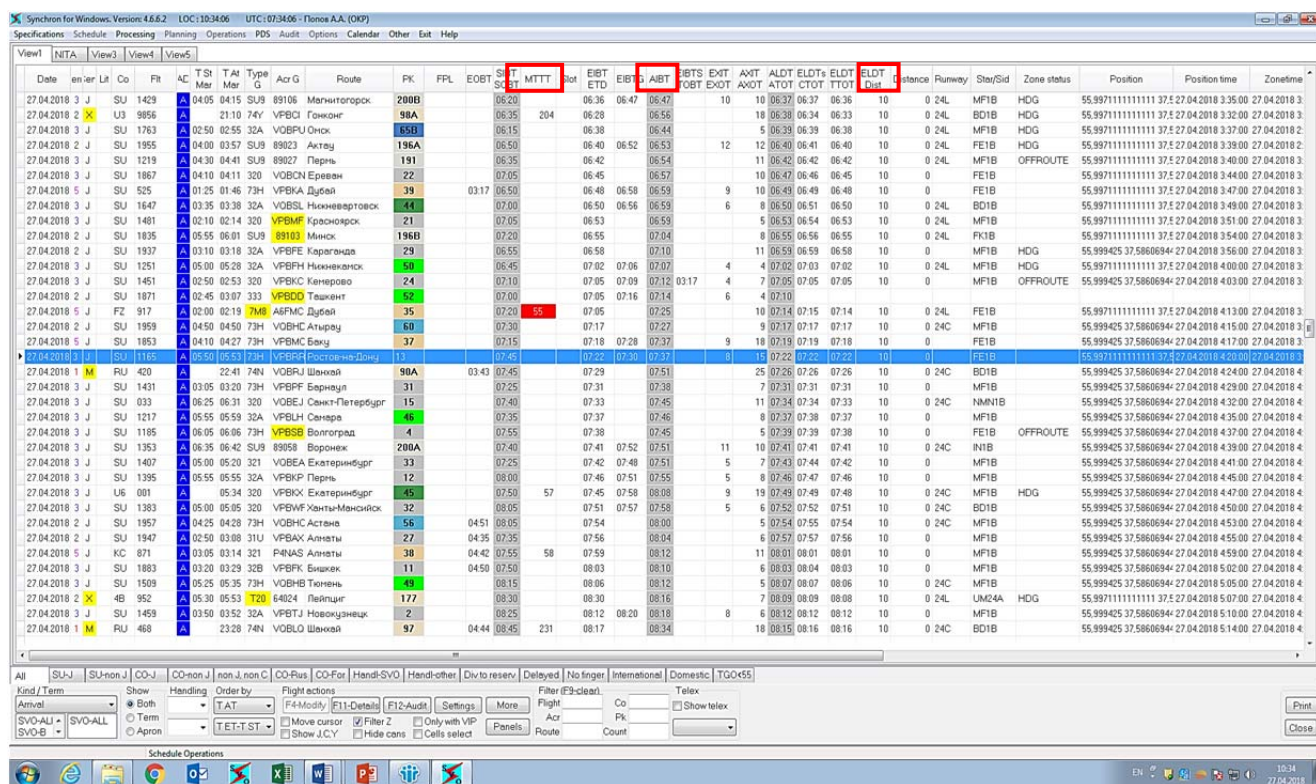


Рис. 11. Интерфейс суточного плана полетов в ЦАБД «Синхрон» для прилетающих рейсов  
Fig. 11. Interface daily flight plan in "Synchron" for arriving flights

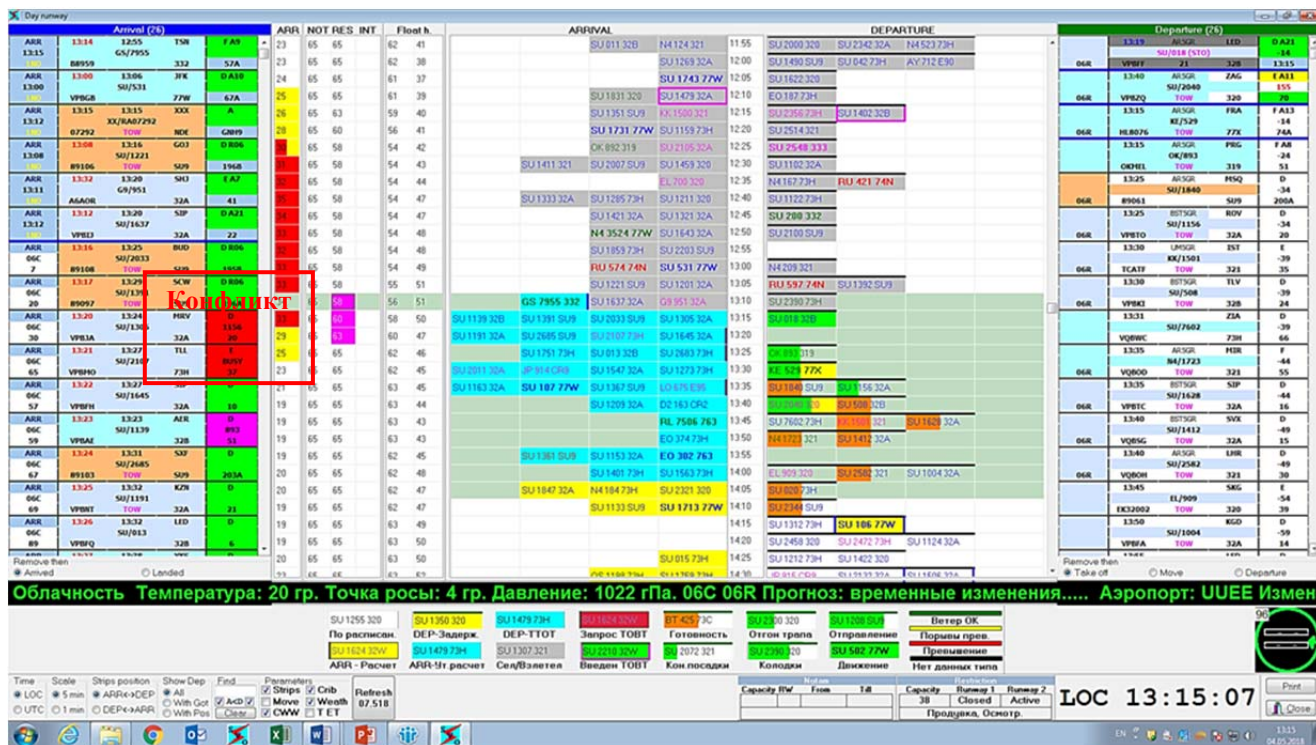


Рис. 12. Интерфейс Day Runway в ЦАБД «Синхрон»  
Fig. 12. Interface Runway Day in "Synchron"

Интерфейс суточного плана полетов в ЦАБД «Синхрон» для вылетающих рейсов (рис. 13) предоставляет партнерам по А-CDM модифицированную информацию о статусе вылетающих рейсов: время начала наземного обслуживания ВС, готовность ВС к посадке пассажиров и окончание посадки, разрешение ATC Clearance, целевое и фактическое время запроса и подтверждения запуска двигателей, целевое и фактическое время руления, отправления и взлета, плановое и фактическое время противообледенительной обработки ВС и т. д.

На основании данных прилетающего рейса вычисляется минимальное время разворота ВС (МТТТ) и определяется целевое время отправления (TOBT) и запуска двигателей (TSAT), которое доводится до заинтересованных партнеров для дальнейшего планирования операций в зоне своей ответственности.

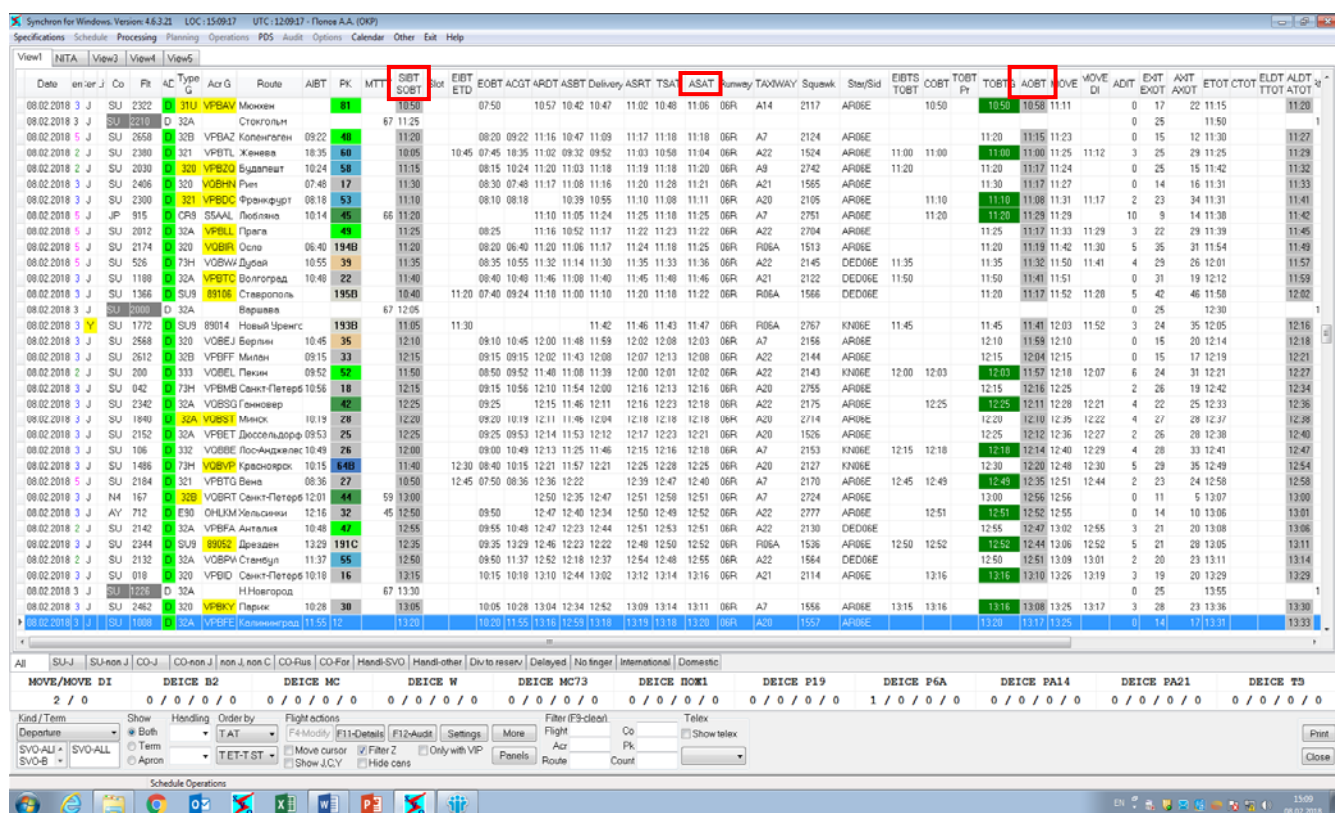


Рис. 13. Интерфейс суточного плана полетов в ЦАБД «Синхрон» для вылетающих рейсов  
Fig. 13. Interface of a daily flight plan in "Synchron" for departing flights

Данные о фактической пропускной способности комплекса ИВПП при публикации НОТАМ, ввода интервалов, ограничивающих вылет, ограничений по боковой составляющей ветра по типам ВС и/или снижении пропускной способности при закрытии одной из полос для производства полетов, оперативно предоставляются партнерам по А-CDM через интерфейс Day Runway в ЦАБД «Синхрон» (рис. 14).

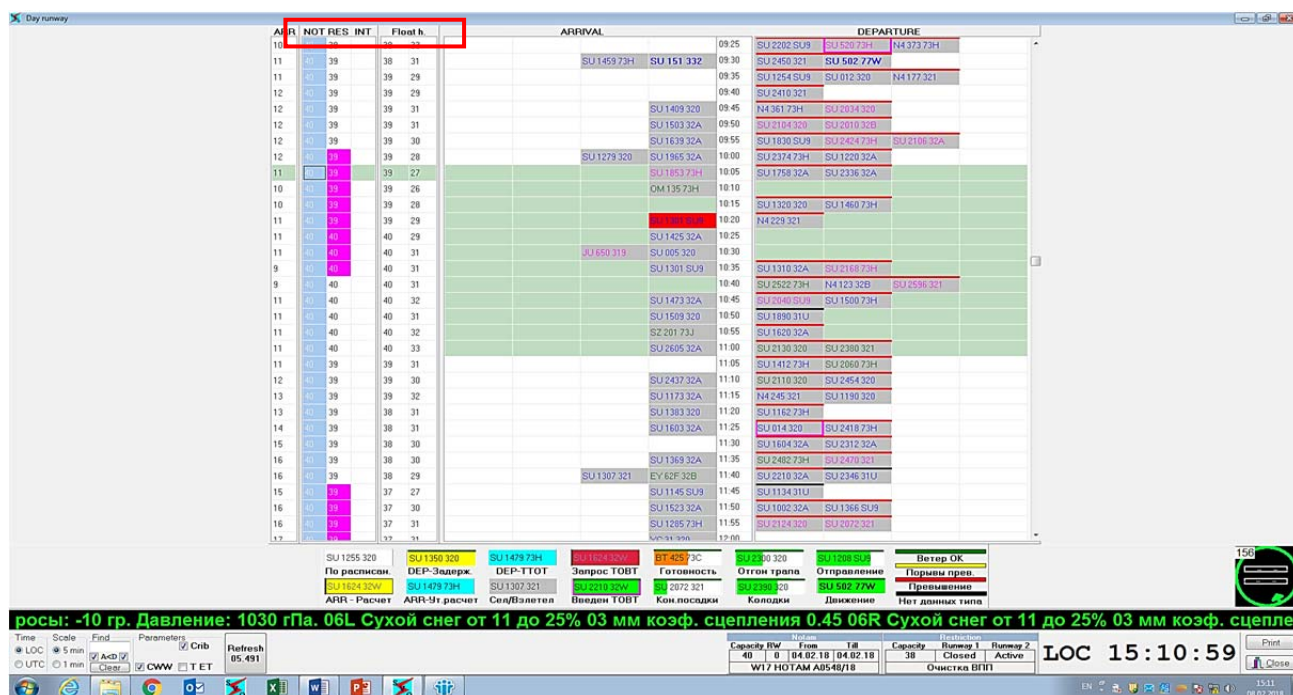


Рис. 14. Интерфейс Day Runway в ЦАБД «Синхрон»  
Fig. 14. Interface Runway Day in "Synchron"

Дополнительно через интерфейс Day Runway распространяется информация по сводке METAR (бегущая строка), статусе рейсов на прилет и вылет, приоритетах авиакомпаний по очередности вылета рейсов. Расчет текущей пропускной способности комплекса ИВПП производится автоматически при вводе данных, ограничивающих пропускную способность ВПП, методом дифференцированной оценки «скользящего часа» с учетом безопасных временных интервалов по турбулентности спутного следа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги проведенного анализа, отметим, что система совместного принятия решения в аэропорту – это инструмент для управления процессами, который будет полноценно функционировать только при полной интеграции циклов управления потоками воздушного движения за счет предоставления расширенной информации о статусах рейсов и ее применения центрами ОВД/ОрВД для планирования операций по обслуживанию движения ВС в соответствии с согласованными процедурами [12].

Совместная с ПАО «Аэрофлот» и ФГУП ГК ОрВД организация и координация работы аэропорта в час пик с применением современных процедур и ИТ-инструментов совместного принятия решений (A-CDM) обеспечивает пунктуальное выполнение суточных планов полетов и исключает создание предпосылок к сбойным ситуациям на аэродроме.

Результативность внедряемых процедур A-CDM и реализация плана повышения пунктуальности полетов в аэропорту Шереметьево способствуют повышению предсказуемости событий и сокращению времени задержек отправления ВС и оцениваются по 65 показателям, основные из которых следующие:

- коэффициент восстановления пунктуальности отправления рейсов: 3,7 (повышение на 34,1 %);
- количество задержек отправок рейсов более 15 минут: 4,78 % (сокращение на 29,3 %);

- количество пропущенных слотов для взлета: 26,8 % (сокращение на 12,4 %);
- пунктуальность выполнения слота для посадки ВС: 30,6 % (повышение на 10,5 %);
- среднее время руления ВС после посадки: 7,3 мин (сокращение на 8,9 %);
- пунктуальность выполнения слота для прибытия ВС: 74,7 % (повышение на 11,3 %);
- пунктуальность выполнения слота для отправления ВС: 95,2 % (повышение на 2,2 %);
- среднее время руления ВС на вылет: 9,7 мин (сокращение на 15,9 %);
- пунктуальность выполнения слота для взлета ВС: 88,3 % (повышение на 9,6 %);
- показатели расчетной экономии авиатоплива: 1157,2 тонн/месяц (повышение на 41,4 %).

По итогам 2017 года аэропорт Шереметьево занял первое место среди 10 лучших аэропортов Европы по показателям сокращения задержки вылетов оборотных рейсов, сохраняя положительную динамику при самой низкой пунктуальности прилета [4]. Показатель рассчитывается как разница между пунктуальностью отправления и прибытия. Остальные аэропорты Европы имеют отрицательные значения при более высокой пунктуальности прилета.

Реализовывая комплексный подход к внедрению инновационных технологий и повышению качества услуг, аэропорт Шереметьево по итогам 2017 года при росте количества взлетно-посадочных операций (ВПО) на 12,9 %, по данным британской исследовательской компании OAG, вошел в первую тройку мировых лидеров по пунктуальности и признан самым пунктуальным европейским аэропортом в категории крупнейших воздушных гаваней с годовым объемом вылетающих пассажиров от 20 до 30 млн человек [3, 5–11].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.
2. **Никулин А.О., Попов А.А.** Внедрение процедур А-CDM в аэропорту Шереметьево // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.
3. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Метод снижения конфликтности на стандартных маршрутах вылета и прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 117–123.
4. **Пятко С.Г.** Повышение эффективности управления воздушным движением в Московской зоне ЕС ОрВД [Электронный ресурс] // Aviation explorer. Режим доступа: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (дата обращения: 22.12.2017).
5. **Людомир А.В., Орлов В.С.** Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве // Прикладная информатика. 2014. № 5(53). С. 89–97.
6. **Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х.** Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 94–114.
7. **Ozlem Sahin Meric.** Optimum arrival routes for flight efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. № 3. С. 449–452.
8. **Paninski L.** Design of experiments via information theory / ed. S. Thrun, L.K. Saul, B. Schölkopf // Advances in Neural Information Processing Systems 16. MIT Press, 2004. Pp. 1319–1326.
9. **Белинский И.А., Смородов Ю.А., Соколов В.С.** Зимнее содержание аэродромов. М.: Транспорт, 1982. 158 с.
10. **Часовников В.Г.** Исследование глиссирования колес самолетов на мокрых аэродромных покрытиях: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972.
11. **Gerthoffert J.** Modelling of aircraft braking coefficient from IMAG friction measurements / C. Grosjean, V. Cerezo, Minh-Tan Do // Airports in Urban Networks. Paris, 2014.

12. Программы развития систем организации воздушного движения Европы и США SESAR и NextGen. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / под ред. Е.А. Федосова. М.: ГосНИИАС, 2011, 256 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Никулин Андрей Олегович**, первый заместитель генерального директора международного аэропорта Шереметьево по производству, nao@svo.aero.

## THE SYSTEM OF COLLABORATIVE DECISION MAKING AS AN EFFECTIVE TOOL FOR THE ORGANIZATION OF THE AIRPORT OPERATION IN PEAK LOADS

**Andrey O. Nikulin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Sheremetyevo International Airport, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

In the article the analysis of functioning a joint decision-making (A-CDM) system of Sheremetyevo Airport is presented during airport operation in a "rush hour". Domestic and international programs of air traffic management (ATM) development assume that the airports will be completely included into the air traffic management network as components of this network. Cooperative decision-making will be used to provide a "seamless" process of planning. This process will take place with participation of airspace users, suppliers of an air navigation service and airports (with use of the automated facilities of arrival, departure and traffic on airfield surface) for the benefit of sequence management to increase runway capacity. The runway equipment has to be modernized, separation standards among aircraft on arrival and departure should be reduced, modern navigation and traffic control on an airfield surface aids have to operate. The runway is referred to the resources which operate according to the principle of only one client service. Influence of weather conditions (the wet runway, severe wind, low visibility) determines the airfield capacity. Arrival and departure control allows optimizing aerodrome operation from the view of cost efficiency and ecology. The system of joint decision-making for an airport is a complex of the procedures aimed at increasing level of air traffic flows organization, airfield and airspace capacity through raising a level of event predictability and optimization of the resource use process. The system allows operating information to obtain the modified output data for decision-making. The main system objectives are to increase the level of temporary accuracy of an event emergence and also its predictability.

**Key words:** system of joint decision-making – Airport Collaborative Decision Making (A-CDM), marginal weather conditions, airport.

### REFERENCES

1. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p., pp. 37–92. (in Russian)
2. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Vnedrenie protsedur A-CDM v aeroportu Sheremetevo* [Implementation of A-CDM procedures at Sheremetyevo airport]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 68–80. (in Russian)
3. **Malygin, V.B. and Nechaev, E.E.** (2014). *Metod snizheniya konfliktnosti na standartnikh marshrutakh vyleta i pribytiya* [Method of conflict resolution on standard departure and arrival routes]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 117–123. (in Russian)
4. **Pyatko, S.G.** (2017). *Povyshenie effektivnosti upravleniya vozdushnim dvizheniem v Moskovskoy zone ES OrVD* [Improving the efficiency of air traffic management in the Moscow zone of the

ATM]. Aviation explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (available at: 22.12.2017). (in Russian)

5. **Lyudomir, A.V. and Orlov, V.S.** (2014). *Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskoy vozduшной обстановки v upravlyaemom vozduшном prostranstve* [Simulation modeling of dynamic air conditions in controlled airspace]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], vol. 5, no. 53, pp. 89–97. (in Russian)

6. **Zolotukhin, V.V., Isaev, V.K. and Davidson, B.Kh.** (2009). *Nekotorye aktualnye zadachi upravleniya vozduшnim dvizheniem* [Some actual problems of air traffic control]. Proceedings of MIPT, vol. 1, no. 3, pp. 94–114. (in Russian)

7. **Ozlem, S.M.** (2015). *Optimum arrival routes for flight efficiency*. Journal of Power and Energy Engineering, no. 3, pp. 449–452.

8. **Paninski, L.** (2004). *Design of experiments via information theory*. Ed. S. Thrun, L.K. Saul, B. Schölkopf. Advances in Neural Information Processing Systems 16, pp. 1319–1326. MIT Press.

9. **Belinskiy, I.A., Smorodov, Yu.A. and Sokolov, V.S.** (1982). *Zimnee sodержanie aerodromov* [Winter maintenance of airfields]. Moscow: Transport, 158 p. (in Russian)

10. **Chasovnikov, V.G.** (1972). *Issledovanie glissirovaniya koles samoletov na mokrykh aerodromnykh pokrytiyakh* [Research wheels of planes aquaplaning on wet air field coverings] *Dis. kand. tekhn. nauk* [The dissertation of PhD of Tech. Sci.]. Leningrad. (in Russian)

11. **Gerthoffert, J., Grosjean, C., Cerezo, V., Do, Minh-Tan.** (2014). *Modelling of aircraft braking coefficient from IMAG friction measurements*. Airports in Urban Networks. Paris.

12. *Programmy razvitiya system organizatsii vozduшного dvizheniya Evropy i SSHA SESAR i NextGen: analiticheskiy obzor po materialam zarubezhnikh informatsionnikh istochnikov* [Programs for the development of air traffic management systems in Europe and the US SESAR and NextGen: an analytical review on the materials of foreign information sources]. (2011). Ed. by E.A. Fedosov. Moscow: GosNIIAS, 256 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Andrey O. Nikulin**, First Deputy of General Director for Production of Sheremetyevo International Airport, [nao@svo.aero](mailto:nao@svo.aero).

Поступила в редакцию 09.02.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 09.02.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-56-66

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА В ДИНАМИЧНОМ ПОЛЕ ТОЧНОСТИ ГЛОНАСС

О.Н. СКРЫПНИК<sup>1</sup>, Н.Г. АРЕФЬЕВА<sup>1</sup>, Р.О. АРЕФЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский филиал Московского государственного технического университета  
гражданской авиации, г. Иркутск, Россия*

Перспективные технологии организации воздушного движения предполагают переход к гибкой маршрутизации на основе использования спутниковых систем навигации. Однако точность спутниковых систем навигации зависит от расположения навигационных спутников относительно определяемого объекта и будет различной в предоставляемом воздушном пространстве. Поэтому конструируемая оптимальная траектория полета воздушного судна должна строиться с учетом точности ее выдерживания в переменном навигационно-временном поле (поле точности) спутниковой системы навигации. Поле точности спутниковых систем навигации можно характеризовать значениями геометрического фактора (пространственного, горизонтального и вертикального). Геометрический фактор спутниковой системы навигации определяется взаимным положением потребителя и спутников, по которым решается навигационная задача, и является детерминированной величиной. Ввиду орбитального движения спутников и перемещения потребителя геометрический фактор будет изменяться в пространстве и времени. Зная законы орбитального движения спутников, можно рассчитать геометрический фактор для любой точки воздушного пространства и для любого момента времени по известному альманаху системы. Это позволяет прогнозировать ожидаемую точность навигационно-временных определений при полете воздушного судна по конкретной воздушной трассе. Для конструирования траекторий полета воздушного судна в поле точности спутниковой системы навигации выбраны методы оптимизации на основе алгоритмов теории графов A-star и Дейкстры. Путем математического моделирования построены оптимальные траектории полета в полях точности ГЛОНАСС при их различной структуре в статичной и динамичной постановке задачи.

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС, геометрический фактор, оптимальная траектория, поле точности, алгоритм A-star, алгоритм Дейкстры.

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост объемов пассажирских и грузовых перевозок, осуществляемых авиационным транспортом, сопровождается повышением интенсивности и плотности воздушного движения. Ввиду ограниченности объема воздушного пространства (ВП) это может привести к снижению безопасности полетов, нарушениям регулярности воздушного движения, к выполнению полетов по неоптимальным (удлиненным) маршрутам и в зонах ожидания. При этом снижается эффективность применения авиационного транспорта, поскольку возрастает полетное время, расход топлива, ресурса воздушного судна (ВС) и его систем, а также неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

Повышение эффективности использования ВП обеспечивается внедрением новых технологий организации воздушного движения (ОрВД), базирующихся на концепции PBN (Performance Based Navigation). Одна из таких технологий, рекомендованная Глобальным аэронавигационным планом ИКАО (4-я ред., 2013 г.), предусматривает переход к гибкой маршрутизации (процедурам динамического изменения маршрута полета).

Для перехода к гибкой маршрутизации всем участникам воздушного движения необходима точная, надежная и своевременная информация о состоянии предоставляемого ВП и организации воздушного движения в нем. Наличие, полнота и достоверность такой информации определяют уровень ситуационной осведомленности экипажей ВС и диспетчеров.

Ситуационная осведомленность предполагает возможность получения в реальном масштабе времени достаточно полного и точного набора необходимой для принятия решения информации о воздушной обстановке и рекомендуемой траектории полета.

В настоящее время уровень ситуационной осведомленности определяется наличием информации о метеообстановке и ВС, находящихся в предоставляемом ВП, а также об обеспечиваемой бортовыми средствами навигации точности определения координат текущего местоположения и, соответственно, точности выдерживания выбираемой траектории движения. Эти факторы являются ключевыми для обеспечения требуемого уровня безопасности полетов и принятия экипажем решения о выборе новой траектории полета.

Выбираемая траектория должна быть оптимальной в соответствии с заданным критерием. Как правило, в качестве критерия оптимальности используется минимальное расстояние (длина линии заданного пути, ЛЗП) между начальной и конечной точками траектории при условии обеспечения требуемого уровня безопасности полета по ней (исключения возможности полета через запретные зоны, опасных сближений с другими воздушными судами).

Точность выдерживания траектории зависит от точности определения координат и параметров движения ВС. Если не обеспечивается требуемая точность выдерживания траектории, то длина линии фактического пути (ЛФП) по ней может намного превзойти расчетное значение – длину ЛЗП, и стать больше, чем при полете по траектории, характеризующейся большей длиной расчетной ЛЗП, но построенной в высокоточном навигационном поле.

Перспективные прикладные навигационные процессы основываются на использовании спутниковых систем навигации (ССН), обеспечивающих в условиях штатного функционирования высокую точность и надежность определения координат и параметров движения ВС. Известно, что точность ССН в значительной степени зависит от расположения навигационных спутников (НС) относительно потребителя. Параметром, характеризующим влияние положения НС относительно потребителя на точность определения его координат, является геометрический фактор (ГФ), который изменяется как во времени, так и в пространстве<sup>1</sup> [1].

Поэтому траектория полета ВС должна строиться с учетом точности ее выдерживания в изменяющемся в пространстве и времени поле точности ССН, характеризуемом значениями ГФ. Решение данной задачи приобретает особую важность при организации воздушного движения в необслуживаемом ВП (океанические и удаленные континентальные маршруты).

Поскольку воздушная обстановка в предоставляемом ВП является динамичной, задача конструирования оптимальной траектории должна решаться в бортовой системе самолетовождения в реальном масштабе времени и, по возможности, с учетом изменения точности определения координат ВС по данным ССН [2, 3].

## МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Траекторию полета ВС можно представить как совокупность последовательных положений его центра масс в пространстве. При 4D-навигации траектория полета задается как в пространстве, так и во времени. Для получения оптимальной заданной траектории полета ВС в пространственно-временных координатах на практике используются различные методы.

Так, методы оптимального управления [4, 5] позволяют решать задачу конструирования траектории полета ВС с помощью закона управления (непрерывного во времени процесса или управляющей последовательности воздействий), обеспечивающего экстремум заданной совокупности критериев качества системы. Задача оптимального управления включает в себя расчет оптимальной программы управления и синтез системы оптимального управления. Оптимальные программы управления, как правило, рассчитываются численными методами нахождения экстремума функционала или решения краевой задачи для системы дифференциальных уравнений. Синтез систем оптимального управления представляет собой задачу нелинейного программирования в функциональных пространствах [6].

<sup>1</sup> ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: справочное пособие / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

Для решения задачи определения программы оптимального управления строится математическая модель управляемого объекта или процесса, описывающая его поведение с течением времени под влиянием управляющих воздействий и собственного текущего состояния. Такая модель для задачи оптимального управления включает в себя: формулировку цели управления, выраженную через критерий качества управления; определение дифференциальных или разностных уравнений, описывающих возможные способы движения объекта управления; определение ограничений на используемые ресурсы в виде уравнений или неравенств. Для применения методов, основанных на теории оптимального управления, необходимо обеспечить адекватность используемых математических моделей динамической системы и наблюдений, что на практике представляет собой достаточно сложную задачу.

Другой известный способ конструирования оптимальных, прежде всего по протяженности, траекторий полета основан на использовании теории графов. При этом в задаче конструирования оптимальных траекторий полета ВС, как правило, не учитывается точность выдерживания полета по конструируемой траектории.

На основе теории графов предлагается новый подход к конструированию минимальных по длине ЛФП траекторий. При его реализации предлагается учитывать точность выдерживания конструируемой траектории полета путем использования информации о характеристиках поля точности радионавигационных средств системы ОрВД в предоставляемой зоне ВП.

К самым известным и популярным алгоритмам поиска кратчайшего пути (траектории) между двумя точками относятся алгоритмы Дейкстры и А\* (A-star) [7, 8].

Алгоритм Дейкстры находит все кратчайшие траектории из заданной вершины графа до всех остальных и работает только для графов без ребер отрицательного веса. При этом каждой вершине приписывается вес  $G$ , характеризующий расстояние от начальной вершины  $A$  до заданной  $F_{mn}$  (рис. 1, а). Алгоритм работает пошагово, на каждом шаге определяется расстояние до вершины  $F_{mn}$  (вес ребра), и его смысл сводится к уменьшению веса вершин.

Пример расчета всех кратчайших путей из одной изначально заданной вершины  $A$  графа до всех остальных вершин представлен на рис. 1, б. Сплошными линиями показаны оптимальные маршруты до каждой вершины, а пунктирными обозначены неоптимальные маршруты до каждой вершины (из-за лишнего шага).

Каждая вершина графа может быть выделена. Если вершина выделена, то путь от нее до начальной вершины кратчайший, если нет – то временный. Обходя граф, алгоритм считает для каждой вершины маршрут и, если он оказывается кратчайшим, выделяет вершину.

Пусть, например, необходимо найти кратчайшее расстояние из вершины  $A$  в вершину  $B$  (рис. 1, в). Для всех соседних для  $A$  вершин алгоритм также рассчитывает веса, при этом ни при каких условиях не выделяя их. Алгоритм заканчивает свою работу, дойдя до конечной вершины  $B$ , и весом кратчайшего пути становится вес конечной вершины. Из рис. 1, в видно, что алгоритм выбрал два пути, поэтому необходим дополнительный критерий выбора или его уточнение.

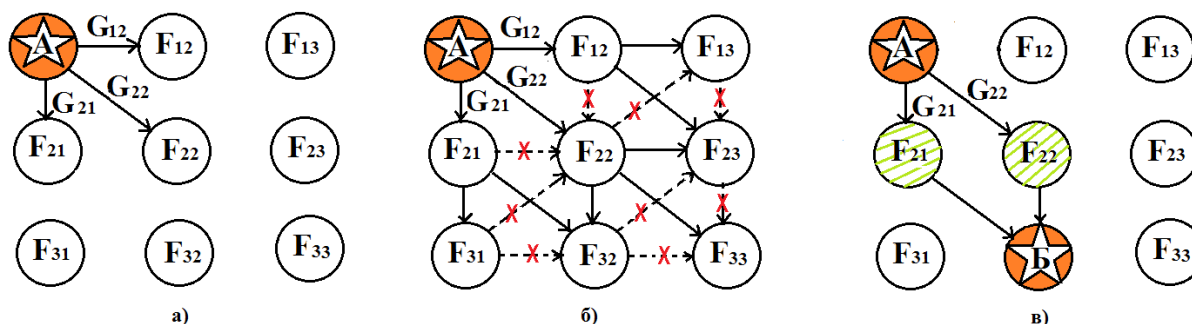


Рис. 1. Пояснения к алгоритму Дейкстры  
Fig. 1. Explanation to the Dijkstra algorithm

Алгоритм  $A^*$  позволяет найти во взвешенном графе (граф, каждому ребру которого поставлено в соответствие некое значение – вес ребра) маршрут наименьшей стоимости от начальной вершины А до конечной Б. Алгоритм  $A^*$  позволяет сочетать математический и эвристический подход для нахождения стоимости пути.

Эвристические функции представляют собой наиболее общую форму, в которой к алгоритму поиска подключаются дополнительные знания о задаче и ограничениях на построение траектории (в случае конструирования оптимальной траектории – частная ортодромия как априорно известная линия кратчайшего расстояния между точками маршрута).

В классическом алгоритме  $A^*$  (рис. 2) порядок обхода вершин определяется эвристической функцией «расстояние + стоимость» вида  $F(x) = G(x) + H(x)$ . Здесь  $G(x)$  – функция стоимости достижения рассматриваемой вершины из начальной вершины,  $H(x)$  – эвристическая оценка расстояния от рассматриваемой вершины до конечной вершины графа.

На рис. 2 представлена интерпретация работы алгоритма на примере графа, где необходимо найти маршрут с наименьшей стоимостью от начальной вершины А до конечной Б.

Таким образом, за счет использования эвристической функции алгоритм  $A^*$  будет проверять не больше, а на практике – значительно меньше узлов графа, чем алгоритм Дейкстры, а значит, его реализация потребует меньших вычислительных затрат.

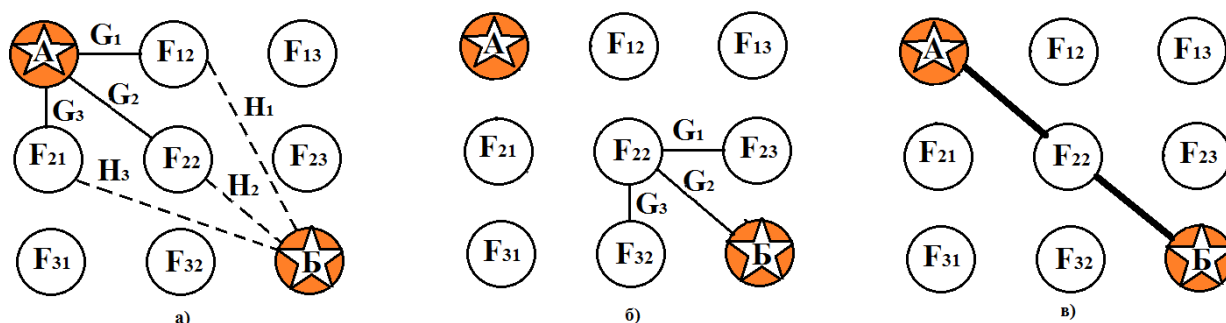


Рис. 2. Пояснения к алгоритму  $A^*$   
Fig. 2. Explanation to the algorithm  $A^*$

Однако классические алгоритмы теории графов не учитывают точность выдерживания заданной траектории, которая будет зависеть от точности навигационной системы (NSE – Navigation System Error) и погрешности системы пилотирования ВС. При наличии NSE длина ЛФП вдоль ортодромии может стать больше, чем при полете по другой выбранной траектории, вдоль которой NSE будет меньшей (рис. 3).

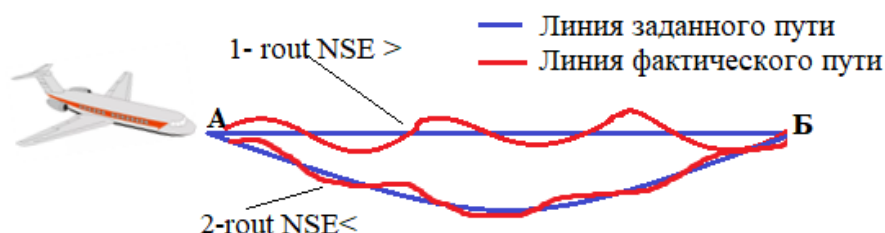


Рис. 3. ЛФП с разными значениями NSE  
Fig. 3. LFP with different NSE values

В данной работе предложен модифицированный алгоритм A-star, в котором используется критерий оптимизации, учитывающий NSE в функции стоимости пути

$$G_{ij} = G_{0ij}(1 + K_{ij}(\text{NSE})),$$

где  $G_{0ij}$  – расчетное расстояние до рассматриваемой вершины,  $K_{ij}(\text{NSE})$  – коэффициент, учитывающий увеличение длины ЛФП из-за ошибок навигационной системы (NSE).

В нашем случае величина  $K(\text{NSE})$  зависит от значения пространственного геометрического фактора PDOP вдоль ребра графа и погрешности измерения дальности до спутников.

Для нахождения значений  $K(\text{NSE})$  экспериментальным путем был использован метод Монте-Карло. В результате определено, что значения  $K(\text{NSE})$  лежат в пределах 0,025–0,063 при изменении PDOP от 1 до 3.

Таким образом, ключевым моментом при конструировании оптимальной траектории полета является учет величины NSE, обеспечиваемой ГЛОНАСС при полете вдоль нее. Для этого необходимо знать характеристики поля точности ГЛОНАСС в предоставляемом ВП и динамику его изменения.

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА НА ОСНОВЕ ПОЛЯ ТОЧНОСТИ ГЛОНАСС

Характеристикой поля точности ГЛОНАСС будем считать распределение в пространстве значений PDOP. Определение совокупности точек, в которых значение ГФ лежит в заданных пределах, позволяет построить поле точности ССН в предоставляемом ВП. Поэтому при конструировании оптимальной траектории полета предлагается использовать эквивалентное полю точности ССН поле значений PDOP (рис. 4).

Геометрический фактор является изменяющейся во времени, но детерминированной функцией, поэтому его можно прогнозировать для заданных точек (областей) на заданный момент или интервал времени по данным действующего альманаха ССН. При этом ГФ обладает достаточно высокой степенью коррелированности в пространстве (кроме случаев смены спутников, находящихся в зоне видимости) и может быть представлен совокупностью точек, удаленных друг от друга на расстояния до 50 км по широте и долготе.

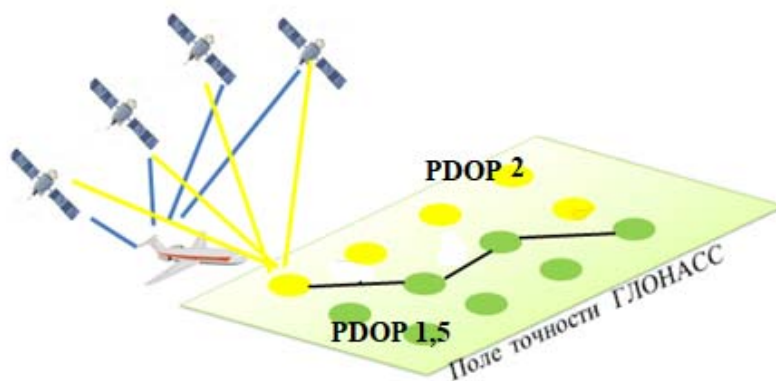


Рис. 4. Конструирование оптимальной траектории полета в поле точности ГЛОНАСС  
Fig. 4. Optimal flight trajectory construction in the GLONASS accuracy field

Применительно к авиационной транспортной системе ВП или его отдельные элементы (узлы), между которыми происходит движение ВС, удобно представить в виде связей или сети маршрутов. Такие сети моделируются в виде графов, а совокупность определенно соединенных

вершин позволяет построить оптимальный маршрут полета между точкой входа и точкой выхода из предоставляемой зоны ВП.

В рамках исследования в среде графического программирования LabVIEW разработан программный комплекс, позволяющий рассчитывать характеристики навигационного сеанса системы ГЛОНАСС и строить поле точности в заданной зоне ВП [9]. В состав комплекса входит модуль, предназначенный для построения оптимальной траектории полета двумя алгоритмами: Дейкстры и A-star.

Программный модуль позволяет рассчитать и построить оптимальные траектории полета для любой задаваемой зоны ВП и для любого интервала времени.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для конструирования оптимальной траектории в задачах гибкой маршрутизации был проведен комплекс исследований, в ходе которых была проверена работоспособность разработанных алгоритмов, оценка их эффективности и достоверности полученных результатов.

При этом решение задачи конструирования траектории можно осуществлять в статичном (построенном на определенный момент времени, например, входа в предоставляемую зону ВП) поле точности ГЛОНАСС, или пытаться учесть при конструировании траектории изменение поля точности (его динамичность) в процессе выполнения полета по ней.

На рис. 5 приведены статичные поля точности ГЛОНАСС (рис. 5, а, б) для различных фиксированных моментов времени и динамичное поле (рис. 5, в), построенное по рассчитанным значениям PDOP в последовательные моменты времени, соответствующие полету ВС по заданному маршруту. Размер поля составил  $1000 \times 1000$  км с шагом 40 км между точками (вершинами), в которых рассчитывалось значение PDOP. Поля точности ГЛОНАСС были построены для зоны воздушного пространства с координатами  $70\text{--}79^\circ$  с. ш. и  $80\text{--}115^\circ$  в. д.

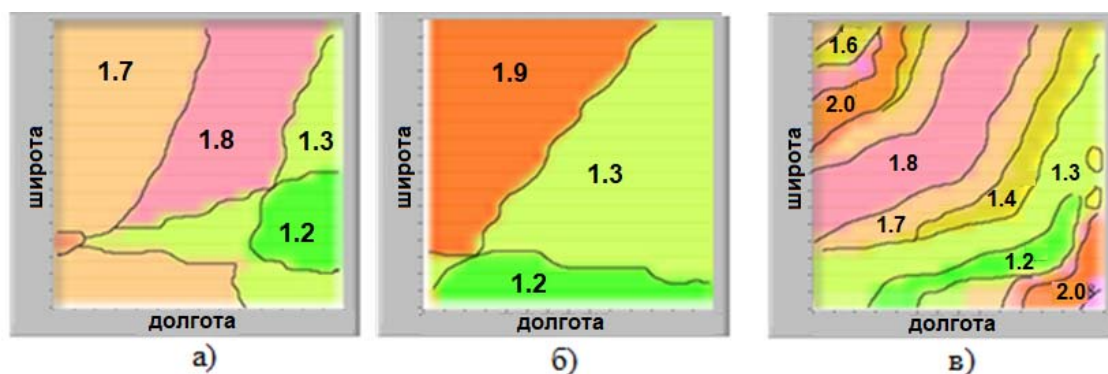


Рис. 5. Поля точности ГЛОНАСС  
Fig. 5. Accuracy fields GLONASS

Из полученных результатов следует, что конфигурация и характеристики поля точности изменяются как в пространстве, так и во времени. Структура и средние значения PDOP для статичных полей точности для разных моментов времени варьируются (от 1,57 до 2,04), а расчет динамичного поля точности позволяет получить информацию о точности ГЛОНАСС по маршруту полета с привязкой к реальному времени (4D-траектория).

На основе полученных полей точности строится взвешенный граф, ребра которого имеют веса, зависящие от распределения значений PDOP в выбранной зоне ВП.

Сравнительная оценка эффективности решения задачи конструирования оптимальной траектории полета ВС в статичном и динамичном полях точности ГЛОНАСС алгоритмами

A-star и Дейкстры проведена на примере тестовой задачи. В тестовой задаче рассматривалась зона ВП размером  $1000 \times 1000$  км, расположенная в высоких широтах. Были выбраны трассы длиной до 1000–1500 км между пунктами А и Б, проходящие по полям различной точности (PDOP от 1,2 до 10). Рассматривался этап маршрутного полета воздушного судна на постоянной высоте и с постоянной скоростью.

На рис. 6 показаны траектории, построенные алгоритмами A-star и Дейкстры. Показаны построенные оптимальные маршруты полета в статичном (рис. 6 а, б) для двух различных фиксированных моментов времени и динамичном (рис. 6, в) поле точности ГЛОНАСС. При этом оба алгоритма построили совпадающие траектории.

Результаты расчетов длин ЛФП для маршрутов, представленных на рис. 6, составили соответственно 1341,64, 1325,39 и 1328,73 км.

Таким образом, выбор оптимальной траектории зависит от структуры и характеристик поля точности. При этом рассмотренная ситуация характеризуется незначительными вариациями поля точности ССН ( $1,2 < PDOP < 2$ ).

Построение оптимальной траектории в статичном поле не позволяет получить однозначно наилучший результат, поскольку при этом не учитывается изменение точности ГЛОНАСС (PDOP) с течением времени и при движении ВС по воздушной трассе. При этом рассчитанная в статичном поле траектория может характеризоваться как увеличенной, так и уменьшенной длиной ЛФП по сравнению с длиной расчетной ЛЗП.

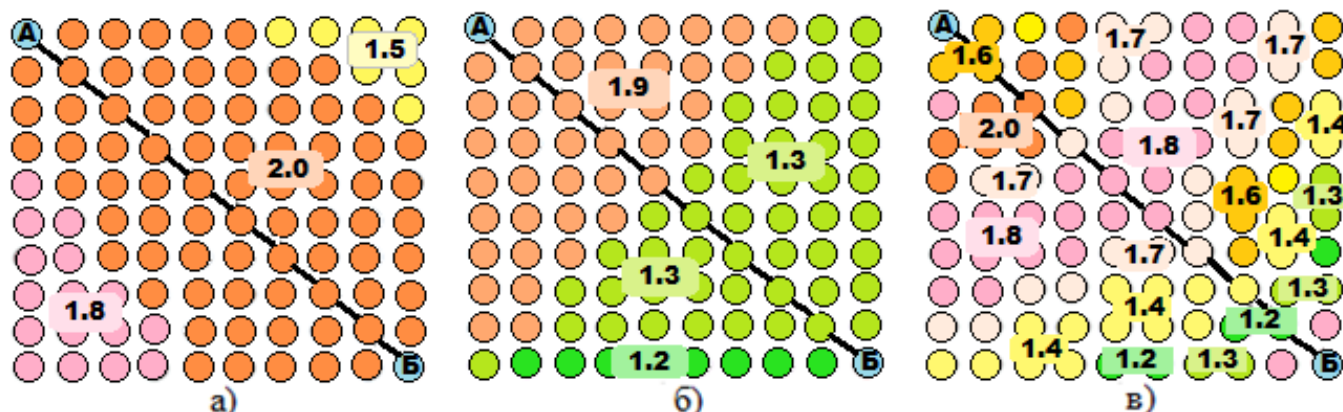


Рис. 6. Построение маршрутов в поле точности ГЛОНАСС  
Fig. 6. Directions in the GLONASS accuracy field

Динамичное поле позволяет провести расчет ЛЗП с учетом изменения PDOP во времени с его привязкой к положению ВС на воздушной трассе. Поэтому все дальнейшие исследования выполнялись в динамичном поле точности ГЛОНАСС.

На рис. 7 представлены маршруты, построенные для двух интервалов времени в динамичном поле точности, характеризующемся незначительными вариациями PDOP (до 2,0).

Результаты расчетов длин ЛФП для маршрутов, представленных на рис. 7, составили соответственно 1328,73 и 1333,7 км при средних значениях PDOP 1,72 и 1,87. При этом алгоритмы Дейкстры и A-star построили совпадающие траектории.

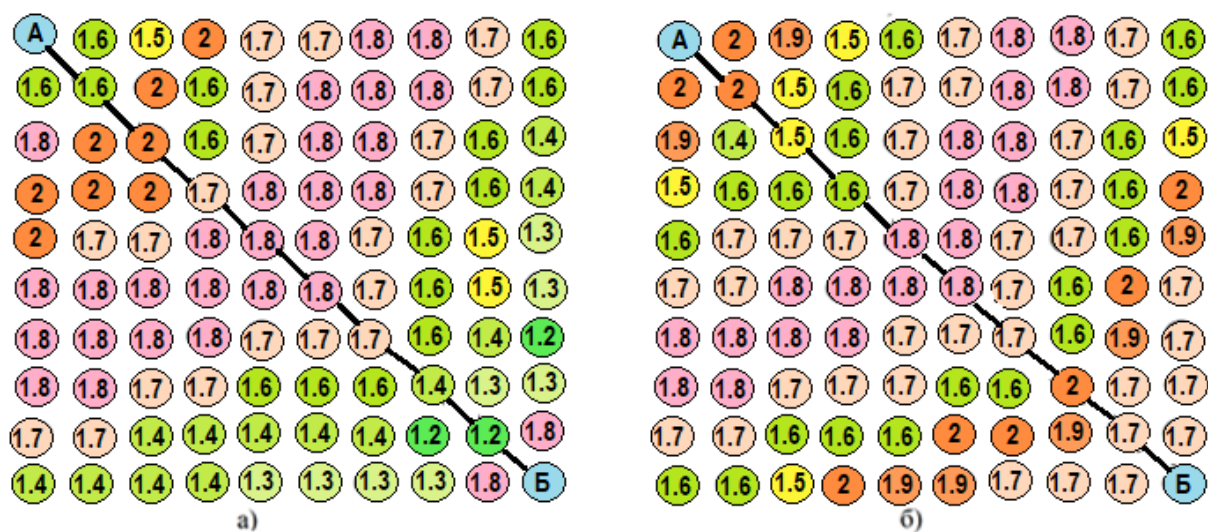


Рис. 7. Траектории полета в слабо изменяющихся динамических полях точности  
Fig. 7. Flight trajectories in weakly varying dynamic accuracy fields

Из полученных результатов следует, что существует наиболее выгодный интервал времени для выполнения полета по заданному маршруту, при котором будет обеспечиваться наименьшая длина ЛФП за счет наилучшего среднего вдоль траектории значения PDOP.

На рис. 8 представлены маршруты, построенные в динамическом, существенно неоднородном поле точности, характеризующемся изменением значений PDOP от 1,1 до 10.

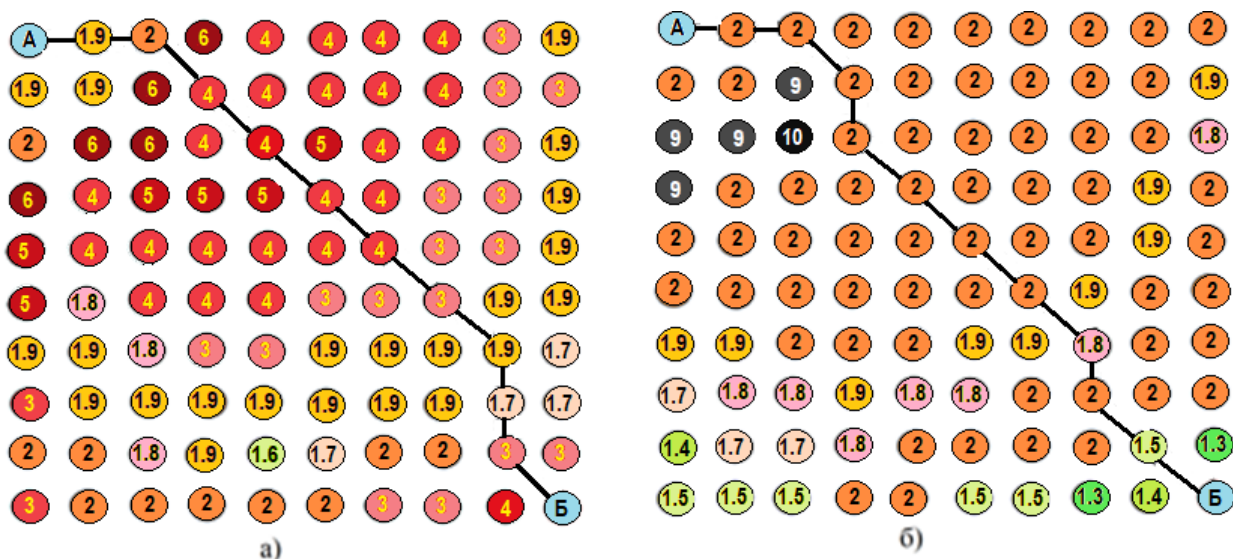


Рис. 8. Траектории полета в существенно неоднородных динамических полях точности  
Fig. 8. Flight trajectories in the substantially heterogeneous and dynamic accuracy fields

Длина ЛФП для маршрутов, представленных на рис. 8, составила соответственно 1505,7 и 1435,1 км при PDOP 3,28 и 2,15. При значительных вариациях значений PDOP алгоритмы Дейкстры и A-star находят также совпадающие траектории по минимуму геометрического фактора PDOP в динамическом поле точности ГЛОНАСС. При этом обходятся зоны с плохими значениями PDOP, за счет чего минимизируется длина ЛФП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика конструирования оптимальной траектории полета ВС позволяет улучшить ситуационную осведомленность экипажа и таким образом повысить эффективность принятия решения о выборе наилучшего маршрута полета в условиях изменения воздушной обстановки и точности аэронавигационного обеспечения.

Выбор оптимальной траектории полета обеспечивает сокращение длины ЛФП. При этом выигрыш в сокращении фактической длины маршрута зависит от характеристик поля точности ГЛОНАСС и достаточно значим для протяженных маршрутов полета.

В исследуемых сценариях алгоритмы A-star и Дейкстры построили совпадающие оптимальные траектории, что характеризует достоверность полученных результатов. При этом алгоритм A-star обладает меньшими вычислительными затратами, так как в решении задачи рассматриваются не все узлы графов, в отличие от алгоритма Дейкстры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. 270 с.
2. Skrypnik O.N., Arefeva N.G. Construction of an optimal flight trajectory in the GLONASS accuracy field // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017. Pp. 129–131.
3. Скрыпник О.Н., Марюхненко В.В. Повышение эффективности навигационного обеспечения транспортных объектов на основе прогноза точности спутниковой радионавигационной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 136–142.
4. Toratani D. Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management: doctoral thesis. Yokohama National University. March, 2016. 101 p.
5. Soler M. Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization / A. Olivares, E. Staffetti, P. Bonami // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2013. Vol. 36, № 5. Pp. 1267–1277.
6. Диль В.Ф., Сизых В.Н. Синтез оптимального управления воздушным судном на основе уравнений нелинейной динамики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 3. С. 139–148.
7. Garret D. Fett. Aircraft route optimization using the A-STAR algorithm: thesis degree of master of science in operations research / Air force institute of technology. 2014. 68 p.
8. Теория графов и сетей при моделировании процессов УВД: учебное пособие / сост. В.А. Карнаухов. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2009. 63 с.
9. Скрыпник О.Н., Арефьев Р.О., Астраханцева Н.Г. Методика построения и анализ полей точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 115–122.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Скрыпник Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования Иркутского филиала МГТУ ГА, skripnikon@yandex.ru.

**Арефьева Наталья Геннадьевна**, аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, n\_astrahanceva\_awesome@mail.ru.

**Арефьев Роман Олегович**, аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, seven7772009@yandex.ru.

## OPTIMIZATION OF AN AIRCRAFT FLIGHT TRAJECTORY IN THE GLONASS DYNAMIC ACCURACY FIELD

Oleg N. Skrypnik<sup>1</sup>, Natalya G. Arefyeva<sup>1</sup>, Roman O. Arefyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia*

### ABSTRACT

Advanced technologies in air traffic management assume the transition to flexible routing based on the use of the satellite navigation systems. However, the accuracy of these systems depends on the location of the navigation satellites in relation to the target object and will vary in the available airspace. Therefore, the designed optimal flight path of the aircraft should be built taking into account the accuracy of its keeping in the variable navigation-time field (accuracy field) of the satellite navigation system. The accuracy field of the satellite navigation systems can be characterized by the geometric factor (spatial, horizontal and vertical). The geometric factor of the satellite navigation system is determined by the relative position of the consumer and the satellites upon which the navigation problem is solved, and is a deterministic value. Due to the orbital motion of satellites and the movement of the consumer, the geometric factor will change in space and time. Knowing the laws of the satellites orbital motion it is possible to calculate the geometric factor for any point in the air space and for any moment of time according to the known almanac of the system. This allows predicting the expected accuracy of the navigation and time determination during the flight on a particular air route. Optimization methods based on the algorithms of A-star and Dijkstra graph theory are chosen for aircraft flight trajectories construction. Mathematical modeling is used for the optimal trajectory construction in the GLONASS dynamic accuracy fields with their various structures in static and dynamic problem setting.

**Key words:** GLONASS, the geometric factor, an optimal trajectory, accuracy field, A-star algorithm, Dijkstra algorithm.

### REFERENCES

1. Solovyev, Y.A. (2000). *Sistemy sputnikovoy navigatsii* [Satellite navigation systems]. Moscow: Eko-Trends. 270 p. (in Russian)
2. Skrypnik, O.N. and Arefyeva, N.G. (2017). *Construction of an optimal flight trajectory in the GLONASS accuracy field*. 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017, pp. 129–131.
3. Skrypnik, O.N. and Maryukhnenko, V.V. (2017). *Povyshenie ehffektivnosti navigatsionnogo obespecheniya transportnykh obektov na osnove prognoza tochnosti sputnikovoy radio-navigatsionnoy sistemy* [Increase in efficiency of navigation support of transport objects on the basis of satellite radio navigation system accuracy forecast]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, vol. 1, no. 53, pp. 136–142. (in Russian)
4. Toratani, D. (2016). *Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management*. Doctoral Thesis. Yokohama National University, March, 2016, 101 p.
5. Soler, M., Olivares, A., Staffetti, E. and Bonami, P. (2013). *Multiphase Mixed-Integer Optimal Control Approach to Aircraft Trajectory Optimization*. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 36, no. 5, pp. 1267–1277.
6. Dil, V.F. and Sizykh, V.N. (2017). *Sintez optimalnogo upravleniya vozdushnym sudnom na osnove uravneniy nelineynoy dinamiki* [Optimal aircraft control synthesis based on the equations of non-linear dynamics]. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 3, pp. 139–148. (in Russian)
7. Garret, D.Fett. (2014). *Aircraft route optimization using the A-STAR algorithm*. Thesis Degree of Master of Science in Operations Research. Air force institute of technology. 68 p.
8. *Teoriya grafov i setey pri modelirovanii protsessov UVD*. (2009). [Graph and network theory in ATM process modeling]. Uchebnoe posobie. The author: V.A. Karnaukhov. Uljanovsk: UVAU GA(VI). 63 p. (in Russian)

9. Skrypnik, O.N., Arefyev, R.O. and Astrakhantseva, N.G. (2015). *Metodika postroeniya i analiz poley tochnosti GLONASS v zadannoy zone vozduhnogo prostranstva* [Technique of construction and analysis of GLONASS accuracy fields in the given zone of airspace]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 115–122. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Oleg N. Skrypnik**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Aviation Radio Electronic Equipment Chair, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, skripnikon@yandex.ru.

**Natalya G. Arefyeva**, Post-graduate student of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, n\_astrahanceva\_awesome@mail.ru.

**Roman O. Arefyev**, Post-graduate student of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, seven7772009@yandex.ru.

Поступила в редакцию 16.03.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 16.03.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-67-77

**ПОСТАНОВКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ МАРШРУТИЗАЦИИ  
И ПЛАНИРОВАНИЯ ГРАФИКОВ ПОЛЕТА ПИЛОТИРУЕМОЙ  
И БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ  
И ПОДХОД К ЕЕ РЕШЕНИЮ С ПОМОЩЬЮ  
ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

**Г.Н. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, В.Б. МАЛЫГИН<sup>2</sup>, Д.А. МИХАЙЛИН<sup>1,3</sup>, ТАН БЯО<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники  
Министерства обороны Российской Федерации,  
г. Москва, Россия*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,  
гранты № 17-29-03185, № 16-08-00070

В работе ставится многокритериальная задача маршрутизации и планирования графиков полета беспилотной и пилотируемой гражданской авиации с использованием метода штрафных функций. Показана актуальность решаемой задачи для управления авиакомпанией в условиях существующих изменений динамической обстановки при большом разнообразии полетных ситуаций. Сформулирована математическая постановка задачи и предложен универсальный критерий оптимальности в виде суммы аддитивной и мультипликативной форм, включающих частные показатели качества. Поиск оптимальных и рациональных вариантов решения задачи оптимальной маршрутизации полетов с учетом имеющихся у компании ресурсов самолетного парка, предложений пользователей воздушного пространства, ограничений постоянного и переменного характера, связанных, к примеру, с неблагоприятными погодными условиями, может осуществляться с помощью однокритериального и многокритериального подхода, но в итоге предлагается использовать генетический алгоритм, обладающий невысокой трудоемкостью вычислений и предлагающий в качестве решений («предков») близкий к оптимальному и рациональному результат. При таком подходе в начале работы алгоритма образуется «элита», что позволяет затем на каждом шаге итерации (эволюции) выполнить операцию скрещивания. В итоге получаем новых «потомков», а путем перестановки хотя бы одного пункта из одного блока в соседний можно получить достаточно большое число представителей, из которых затем с помощью критерия может быть отобрана новая «элита». Практика использования генетических алгоритмов показала, что наряду с достижением с его помощью глобального экстремума процесс существенного улучшения результатов планирования достигается за несколько шагов эволюции, и их число явно меньше, чем число шагов при использовании численных методов параметрической оптимизации. Предлагаемый подход позволит значительно повысить эффективность и качество планирования выполнения полетов авиакомпании с учетом разнообразия самолетного парка, коммерческой загрузки и влияния внешней среды. Особую актуальность данная задача приобретает в условиях совместного управления (CDM), где в качестве дополнительных критериев могут рассматриваться аэронавигационные данные.

**Ключевые слова:** штрафные функции, оптимальное управление, воздушные суда, генетический алгоритм, совместное управление (CDM).

**ОБЩИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТОВ**

При внезапных и прогнозируемых изменениях динамической обстановки, возникающей в пилотируемой и беспилотной авиации, необходимо заново как перепланировать маршруты и расписание полетов между заданными пунктами, так и выбрать для каждого рейса тип лета-

тельного аппарата с учетом ряда важных факторов [1]. К числу этих факторов прежде всего относятся планируемая длительность полетов, определяющая потребные расходы топлива, необходимость соблюдения графика обслуживаемых пунктов и их относительную значимость или важность, которая является для каждого пункта переменной по ряду рассмотренных ниже причин. Особую значимость данная задача приобретает при совместном управлении CDM [1, 9], где от принятого авиакомпанией решения зависит качество деятельности других авиационных служб, в частности аэронавигационных.

В пилотируемой авиации выбранные маршруты включают, как правило, конечное число пунктов назначения или прилета-вылета, чтобы, во-первых, общее время выполнения одного рейса не превышало одних суток, во-вторых, выбранная последовательность обслуживаемых пунктов удовлетворяла критерию минимума суммарной длительности полета при обслуживании каждого пункта один раз с целью минимизации расхода топлива. В-третьих, графики вылета-прилета обычно составляются в зависимости от коммерческого спроса. В свою очередь, пассажирские рейсы считаются наиболее важными, т. к. задержки этих рейсов ведут к дополнительным расходам по организации ожидания.

Таким образом, в обычном режиме работы расписание прилета-вылета и работы аэропортов в целом практически неизменно. От эффективности функционирования системы управления воздушным движением в значительной степени зависят безопасность полетов и экономические показатели работы авиакомпаний. Однако при изменении обстановки могут быть ситуации, когда организация воздушного движения должна быть перепланирована. К числу таких в гражданской авиации, в частности, относятся следующие ситуации:

- различные сезоны календарного года, а также в праздничные дни, когда спрос пассажирами на ряд рейсов пассажирской авиации существенно меняется и поддается прогнозированию;
- сами некоторые крупные события в стране и за рубежом прогнозируются (например, предстоящий чемпионат мира по футболу), но количественные оценки этого прогноза имеют неудовлетворительную точность, что в принципе требует режима оперативного перепланирования работы;
- наиболее частой причиной отмены штатного режима работы является нелетная погода в ряде регионов, что также требует оперативного вмешательства. В легкой транспортной, в том числе почтовой, авиации на местных авиалиниях потребности могут меняться гораздо чаще, а при обслуживании мобильных наземных объектов (геологические партии, экспедиции и т. д.) меняются как состав обслуживаемых объектов и их важности, так и сами маршруты перелетов, а также тип летательного аппарата, например, вертолет);
- спрос пассажиров на отдельные рейсы может неожиданно упасть или возрасти, и поэтому необходимо определить подходящий тип воздушного судна (вместо широкофюзеляжного тяжелого самолета использовать другой тип с подходящей дальностью или наоборот).

Для беспилотной авиации наиболее характерны следующие случаи:

- число обслуживаемых пунктов и их состав меняется обычно в каждом вылете по запросам потребителя;
- динамика изменения поведения обслуживаемых пунктов настолько высока, что их важность быстро возрастает по мере задержки в их обслуживании, и поэтому в зависимости от ситуации сильно меняется число самих вылетов;
- удобство обслуживания самих наземных пунктов (например, их обнаружения и наблюдения бортовыми техническими средствами) зависит от освещенности, известного времени их активного поведения, погодных метеоусловий, скоростей движения наблюдаемых мобильных наземных объектов и других исходных данных. Поэтому график их наиболее удобного или наиболее эффективного обслуживания становится одним из важнейших факторов планирования полетов беспилотников, «попадающих в нужном месте в нужное время» [3].

Таким образом, общим условием возрастающей сложности планирования работы пилотируемой и беспилотной авиации является существование динамической обстановки, когда в каждой конкретной ситуации нужно принять многокритериальное решение, учитывающее ряд перечисленных выше факторов и требующее новых подходов к получению оптимального результата.

Целесообразность совместного рассмотрения задач оптимального планирования полетов гражданской и беспилотной авиации обусловлена не только пользой взаимопроникновения известных в своих областях методов, но и их ближайшим совместным использованием аэродромов и окружающего воздушного пространства. Также есть реальная перспектива включения беспилотников в состав гражданской авиации для мониторинга безопасной работы аэропортов, перевозки легких (в частности, почтовых) грузов беспилотными транспортными средствами и других вспомогательных задач.

В данной работе общими и достаточно весомыми факторами, определяющими эффективность планирования полетов, являются их длительность и общая длина пройденного пути, своевременность соблюдения графика обслуживания тех пунктов, для которых он задан, и завершение – переменная в общем случае важность обслуживаемых пунктов.

### ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации планирования полетов формулируется при следующих исходных данных.

1. Заданы число  $n$  и состав обслуживаемых пунктов маршрутного полета, их местоположение, либо матрица расстояний  $r_{ij}$  между ними, как показано на рис. 1, в виде матрицы попарных расстояний [10].

| $i/j$    | 1        | 2        | ...      | $j$      | $n$      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1        | $\infty$ | $r_{12}$ | ...      | $r_{1j}$ | $r_{1n}$ |
| 2        | $r_{21}$ | $\infty$ |          | $r_{2j}$ | $r_{2n}$ |
| $i$      | $r_{i1}$ | $r_{i2}$ | $\infty$ | $r_{ij}$ | $r_{in}$ |
| $\vdots$ |          |          |          | $\infty$ |          |
| $n$      | $r_{n1}$ | $r_{n2}$ |          | $r_{nj}$ | $\infty$ |

Рис. 1. Матрица 1 попарных расстояний между двумя пунктами

Fig. 1. Matrix 1 of pairwise distances between two points

2. Скорость полета  $V$  любого летательного аппарата постоянна и заранее известна. Поэтому при заданном участке полета из пункта  $i$  в пункт  $j$  время полета  $t_{ij}$  и, соответственно, расход топлива также известны:

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{V}. \quad (1)$$

Поэтому при выборе определенного числа ( $n$ ) пунктов и последовательности пребывания в них в виде маршрута общий расход топлива определяется при заданном типе летательного аппарата однозначно в виде суммы слагаемых, вычисляемых по формуле (1). Эта общая оценка относится к категории затрат и является первой штрафной функцией  $\Pi_1$ , которую нужно учесть при определении общей эффективности.

3. Для всех или части пунктов задан график моментов  $t_{ij}$  начала обслуживания или интервалов времени, когда каждый пункт лучше всего обслужить. Если иметь в виду только такие пункты (пусть их число равно  $m \leq n$ ), то эти ограничения по удобству обслуживания можно представить в виде второй матрицы, показанной на рис. 2.

| $i/j$    | 1        | 2        | ...      | $j$      | $n$      |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1        | $\infty$ | $t_{12}$ | ...      | $t_{1j}$ | $t_{1n}$ |
| 2        | $t_{21}$ | $\infty$ |          | $t_{2j}$ | $t_{2n}$ |
| $i$      | $t_{i1}$ | $t_{i2}$ | $\infty$ | $t_{ij}$ | $t_{in}$ |
| $\vdots$ |          |          |          | $\infty$ |          |
| $n$      | $t_{n1}$ | $t_{n2}$ |          | $t_{nj}$ | $\infty$ |

Рис. 2. Матрица 2 моментов начала обслуживания пункта  $j$  после перелета из пункта  $i$   
Fig. 2. Matrix 2 of the moments of service beginning of point  $j$  after a flight from point  $i$

Однако в отличие от предыдущей матрицы, элементы матрицы (рис. 2) штрафами не являются, а ими являются параметры  $\Delta t_{ij}$  «несоблюдения графика», когда обслуживание происходит «не вовремя» (с опозданием или опережением), что является следствием неудачного выбора маршрута полета [7]. Сумма этих отклонений в течение всего полета является второй штрафной функцией  $\Pi_2$ , которую, как правило, аналитически вычислить невозможно, а можно определить лишь численно, и необходимо также учесть при оценке общей эффективности в качестве «расходной части».

4. Третьим не менее существенным фактором при оценке эффективности является результативность или различная значимость обслуживания каждого пункта, что определяет «доходную часть» системы в целом. Для количественной оценки зависимости этого фактора от разных причин проведем более детальный анализ по пунктам.

4.1. У каждого пункта есть своя априорная важность  $b_{\max i}$  его обслуживания (в частности, у Москвы и Петербурга она максимальна, у столиц регионов – ниже, областных центров – еще ниже и т. д.).

4.2. В пилотируемой авиации кроме априорной важна апостериорная информация о имеющемся спросе или текущей покупательной способности  $\lambda_{ij}$  на различные рейсы из заданного пункта  $i$  в каждый из оставшихся пунктов  $j$ . Считая потоки пассажиров отлета  $\lambda_{ij}$  и прилета  $\lambda_{ji}$  одинаковыми, эту информацию можно представить с помощью матрицы (рис. 3).

| $i/j$    | 1              | 2              | ... | $j$            | $n$            |
|----------|----------------|----------------|-----|----------------|----------------|
| 1        | 0              | $\lambda_{12}$ |     | $\lambda_{1j}$ | $\lambda_{1n}$ |
| 2        | $\lambda_{21}$ | 0              |     | $\lambda_{2j}$ | $\lambda_{2n}$ |
| $i$      | $\lambda_{i1}$ | $\lambda_{i2}$ | 0   | $\lambda_{ij}$ | $\lambda_{in}$ |
| $\vdots$ |                |                |     | 0              |                |
| $n$      | $\lambda_{n1}$ | $\lambda_{n2}$ |     | $\lambda_{nj}$ | 0              |

Рис. 3. Матрица 3 покупательной способности пассажиропотока или спроса для рейса  $ij$   
Fig. 3. Matrix 3 purchasing power of passenger traffic or demand for flight  $ij$

С помощью этой матрицы можно также оценить значимость  $\lambda_i$  каждого пункта суммой элементов в строке  $j$  или столбце  $i$ .

$$\lambda_i = \sum_{i \neq j}^n \lambda_{ij} = \sum_{j \neq i}^n \lambda_{ij} \quad (2)$$

Таким образом, апостериорная важность пункта пропорциональна скорости потока пассажиров. Недостаток этой модели состоит в том, что в случае непогоды или других задерживающих полеты причин потребность в обслуживании неограниченно растет, что не учитывает попытки пассажиров выбраться из пункта другим путем.

4.3. В беспилотной авиации задержки в обслуживании пунктов, в частности при попытке их регулярного наблюдения, приводят к обоснованному росту важности  $b_i$  каждого пункта по экспоненциальному закону

$$b_i = b_{max i} (1 - e^{-\lambda_i \tau}), \quad (3)$$

где  $\tau$  – время задержки в обслуживании (например, наблюдения). Вместе с тем считается, что тут же после очередного наблюдения важность пункта обнуляется, т. к. интерес к нему временно пропадает. В целом это можно описать в дифференциальной форме:

$$b_i = \begin{cases} (b_{max i} - b_i)\lambda_i & \text{– при необслуживании} \\ -\frac{b_i}{\Delta t} & \text{– при обслуживании.} \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, модель (4) одновременно учитывает как априорную ( $b_{max i}$ ), так и апостериорную значимость  $\lambda_i$  каждого пункта, и может быть взята за основу. В итоге третий фактор как общая сумма важностей всех перевозок может быть определен в виде

$$B = \sum_{i=1}^n b_i \rightarrow \max. \quad (5)$$

4.4. Общий показатель  $B$  учитывает лишь число обслуживаемых пассажиров, но не уделяет внимание выбираемому типу  $K$  воздушного судна в каждом рейсе ( $ij$ ), однако от этого выбора зависит стоимость билетов, стоимость расхода топлива и другие экономические показатели, от которых зависит в свою очередь доход  $D_{ij}$  каждого рейса. Если считать выбор типа воздушного судна альтернативным ( $k = 1, \dots, N$ ), то доход  $D_{ij}$  при цене  $C_k$  каждого билета равен

$$D_{ij} = \max_k \sum_{k=1}^N C_k \lambda_{ijk}. \quad (6)$$

Приведенные формулы (1)–(6) являются предпосылкой для формирования более общих критериев оптимальности планирования.

5. Сами критерии оптимальности, которые известны в настоящее время, при их перечислении выглядят так. Различают однокритериальные, двухкритериальные и многокритериальные задачи.

5.1. К числу однокритериальных задач физически применительно к данной работе можно указать [4]:

– критерий минимума длины пути маршрута

$$I_1 = \min \Pi_1; \quad (7)$$

– критерий минимума несвоевременного соблюдения графика полета

$$I_2 = \min \Pi_2; \quad (8)$$

– критерий максимума дохода или проще – суммарной важности

$$I_3 = \max B. \quad (9)$$

Каждый из этих критериев является показателем качества работы, но полученные оценки характеризуют это качество по отдельности.

5.2. К числу двухкритериальных задач можно отнести следующие эвристические показатели [6]:

– критерий минимума отношения расстояния до пункта  $r_{ij}$  к его важности  $b_j$

$$I_4 = \min \frac{r_{ij}}{b_j}; \quad (10)$$

– критерий минимума отношения штрафа  $\Delta t_{ij}$  за несоблюдение графика к важности пункта

$$I_5 = \min \frac{\Delta t_{ij}}{b_j}; \quad (11)$$

– критерий произведения двух штрафных функций  $r_{ij}$  и  $\Delta t_{ij}$ , определяющих «расходную часть системы»

$$I_6 = \min r_{ij} \cdot \Delta t_{ij}. \quad (12)$$

Вместе с тем поставленная в данной работе задача является многокритериальной, и для нее необходимо найти новые подходы к оценке качества планирования в виде особой свертки трех показателей –  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $D$  и т. д.

При перечисленных допущениях требуется:

- сформировать общий критерий оценки оптимальной эффективности системы, учитывающий в свертке его расходную и доходную часть;
- предложить подход к решению многокритериальной задачи в виде более совершенного алгоритма маршрутизации и планирования графика полета в новой динамической обстановке.

### ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

При решении различных многокритериальных задач обычным является подход [1], когда критерием общей оценки служит среднее значение отдельных частных показателей  $x_i$  или их общая сумма в баллах, т. е.

$$I = \max \sum_{i=1}^n x_i, \quad (13)$$

где  $x_i$  – такие показатели, увеличение которых явно желательно, и при нормировании они удовлетворяют ограничению  $0 \leq x_i \leq 1$ .

Однако в ряде случаев эта оценка не учитывает как различную важность отдельных показателей, так и их возможную несбалансированность. Например, в системах обучения [5] одну и ту же сумму баллов пяти показателей имеют два обучаемых лица – 3, 3, 3, 3, 4 и 2, 2, 3, 4, 5, в то время как первое обучаемое лицо явно предпочтительнее второго (которого обычно отчисляют из института). Между тем произведение этих же показателей у второго лица явно меньше, чем у первого. Поэтому представление максимизируемого критерия в виде взвешенной суммы аддитивной и мультипликативной форм показателей является более целесообразной сверткой

$$I_8 = \max_{x_i} \left( C_1 \sum_{i=1}^n x_i + C_2 \prod_{i=1}^n x_i \right). \quad (14)$$

Использование свертки (14) в качестве критерия оптимизации позволяет исключить «узкие места» в системе, когда один из показателей  $x_i \rightarrow 0$ , поскольку в этом случае второе слагаемое в формуле (14) сразу же обнуляется, что приводит к заметному ухудшению критерия  $I_8$ .

Применительно к рассматриваемой в данной работе задаче необходимо, во-первых, все три максимизируемых показателя нормировать, т. е. превратить в безразмерные путем их деления на максимальные значения:

$$x_1 = \frac{\Pi_{1min}}{\Pi_1}; \quad x_2 = \frac{\Pi_{2min}}{\Pi_2}; \quad x_3 = \frac{B}{B_{max}}, \quad (15)$$

где  $\Pi_{1min}$  – минимальная общая длина маршрута;  
 $\Pi_{2min}$  – минимальное общее время несоблюдения графика;  
 $B_{max}$  – максимально возможная суммарная важность пунктов, попавших в маршрут.

Во-вторых, учтем фактор неодинаковой значимости каждого нормированного показателя  $x_i$  с помощью весовых коэффициентов  $C_1, C_2, C_3$ , назначаемых потребителем. В-третьих, представим свертку  $I_8$  еще более компактно в виде

$$I_0 = \max(x_1 + A_1)(x_2 + A_2)(x_3 + A_3), \quad (16)$$

где

$$A_1 = \sqrt{\frac{c_2 c_3}{c_1}};$$
$$A_2 = \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}};$$
$$A_3 = \sqrt{\frac{c_1 c_2}{c_3}}.$$

Тогда свертка  $I_0$  более подробно состоит из членов степенного ряда:

$$\begin{aligned} I_0 &= \max\{x_1 A_2 A_3 + x_2 A_1 A_3 + x_3 A_1 A_2 + x_1 x_2 A_3 + x_1 x_3 A_2 + x_2 A_3 A_1 + x_1 x_2 x_3\} = \\ &= \max(c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + x_1 x_2 \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}} + x_1 x_3 \sqrt{\frac{c_1 c_3}{c_2}} + x_2 x_3 \sqrt{\frac{c_2 c_3}{c_1}} + x_1 x_2 x_3). \end{aligned} \quad (17)$$

Достоинство предлагаемой нелинейной свертки состоит в том, что для нее достаточно задать всего три числа:  $C_1, C_2, C_3$ .

Что касается самого алгоритма решения многокритериальной задачи маршрутизации и планирования графика полетов, то с учетом возможности получения в начале оптимального поиска рациональных вариантов решения («предков») с помощью однокритериального подхода по формулам (7)–(9) или двухкритериального подхода по формулам (10)–(12) в итоге предлагается использовать генетический алгоритм [2, 5, 8].

При этом подходе в начале работы алгоритма образуется «элита» из шести представителей, что позволяет затем на каждом шаге итерации выполнить операцию скрещивания путем разбиения каждого маршрута на три блока – в начале, середине и конце полета. В итоге можно получить  $3^6$  «потомков», а путем перестановки хотя бы одного пункта из одного блока в соседний можно получить достаточно большое число представителей, из которых затем с помощью критерия (16) может быть отобрана новая «элита» из 6 представителей на одном шаге эволюции.

Практика использования генетических алгоритмов показала, что наряду с достижением с его помощью глобального экстремума процесс существенного улучшения результатов планирования достигается за несколько шагов эволюции [5], и их число явно меньше, чем число шагов при использовании численных методов параметрической оптимизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- значительное число влияющих на эффективность факторов и разнообразие ситуаций в динамической обстановке требует разработки универсального критерия оптимальности планирования и алгоритма многомерной маршрутизации как для пилотируемой, так и беспилотной авиации;
- представленные в постановке задачи математические модели штрафных функций и значимости обслуживаемых пунктов позволяют получить количественные оценки расходной и доходной части оптимизируемой системы управления деятельностью авиакомпаний;

– установлено, что при решении многокритериальной задачи планирования маршрутных полетов более эффективным является генетический алгоритм, по сравнению с целочисленным программированием, обладающий высоким быстродействием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с. С. 351–414.
2. **Аллилуева Н.В., Руденко Э.М.** Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации // Труды МАИ. 2017. № 96.
3. **Чехов И.А., Чехов О.И.** Алгоритм формирования динамической очереди БПЛА при заходе на посадку // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 25–30.
4. **Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л.** Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многоагентной системы // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2008. № 7. С. 85–88.
5. **Кузнецова Т.И., Царегородцева М.Г.** Комплексная оценка качества изучения иностранного языка в виде суммы аддитивной и мультипликативной сверток отдельных показателей // Труды XXV международной конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 2016 г. Технология. С. 208.
6. **Соболев Е.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
7. Программы развития систем организации воздушного движения Европы и США SESAR и NextGen: аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / под ред. Е.А. Федосова. М.: ГосНИИАС, 2011. 256 с.
8. **Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А.** Постановка и решение задачи оперативной коррекции прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–15.
9. **Луговая А.В., Коновалов А.Е.** Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–15.
10. **Кулаков Ю.А., Коган А.В., Морозовский Т.О.** Способ организации многопутевой маршрутизации с помощью модифицированного метода ветвей и границ [Электронный ресурс] // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. 2015. № 62. С. 27–31. Режим доступа: <http://it-visnyk.kpi.ua> (дата обращения: 28.08.2018).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лебедев Георгий Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), [kaf301@mai.ru](mailto:kaf301@mai.ru).

**Малыгин Вячеслав Борисович**, начальник учебно-тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, [mbv898@ya.ru](mailto:mbv898@ya.ru).

**Михайлин Денис Александрович**, кандидат технических наук, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), научный сотрудник Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники Министерства обороны Российской Федерации, [tau\\_301@mail.ru](mailto:tau_301@mail.ru).

**Тан Бяо**, магистрант Московского авиационного института (НИУ), [tau\\_301@mail.ru](mailto:tau_301@mail.ru).

## FORMULATION OF MULTICRITERIA PROBLEM OF ROUTING AND SCHEDULING OF MANNED AND UNMANNED AIRCRAFT IN A DYNAMIC ENVIRONMENT AND APPROACH TO ITS SOLUTION USING GENETIC ALGORITHMS

Georgiy N. Lebedev<sup>1</sup>, Vyacheslav B. Malygin<sup>2</sup>, Denis A. Mikhaylin<sup>1,3</sup>, Tan Byo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Main Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defence of the Russian Federation,  
Moscow, Russia

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research,  
grants № 17-29-03185, № 16-08-00070

### ABSTRACT

The article deals with the multi-criteria task of routing and scheduling of unmanned and manned aircraft using the method of penalty functions. The authors describe the urgency of the problem being solved for the airline management under the conditions of the existing changes in the dynamic situation with a great variety of flight situations. A mathematical statement of the problem is formulated and a universal optimality criterion is proposed in the form of a sum of additive and multiplicative forms, including partial quality indicators. The search for optimal and rational solutions to the problem of optimal flight routing, taking into account the airline fleet resources, airspace users' offers, constant and variable restrictions, associated, for example, with unfavorable weather conditions, can be implemented using a one-criteria and multi-criteria approach, but as a result, it is proposed to use a genetic algorithm that has low computational complexity and offers as solutions ("ancestors"), close to the optimal and rational result. With this approach, an "elite" is formed at the beginning of the algorithm, which allows the crossing operation to be performed at each step of the iteration (evolution). As a result, we get new "descendants", and by rearranging at least one item from one block to the next one, we can get a sufficiently large number of representatives, from which a new "elite" can be selected with the help of the criterion. The practice of using genetic algorithms has shown that along with the achievement of a global extremum with it, the process of substantial improvement of planning results is achieved in several evolution steps, and their number is clearly less than the number of steps when using numerical methods of parametric optimization. The proposed approach will significantly improve the efficiency and quality of flight planning for the airline, taking into account the diversity of aircraft fleet, payload and environmental impact. This task is especially important under the conditions of joint management (CDM), where aeronautical data can be considered as additional criteria.

**Key words:** penalty functions, optimal control, aircraft, genetic algorithm, collaborative decision-making (CDM).

### REFERENCES

1. Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p., pp. 351–414. (in Russian)
2. Allilueva, N.V. and Rudenko, E.M. (2017). *Matematicheskiy metod rascheta celevoy funktsii na grafakh i reshenie zadachi marshrutizatsii* [Athematic method of calculating the objective function on graphs and solving routing problems]. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], no. 96. (in Russian)
3. Chekhov, I.A. and Chekhov, O.I. (2017). *Algoritm formirovaniya dinamicheskoy ocheredi BPLA pri zahode na posadku* [Algorithm for the formation of a dynamic queue of UAVs at the approach]. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 25–30. (in Russian)
4. Zaitsev, A.V. and Talimanchuk, L.L. (2008). *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogoagentnoy sistemi* [Intellectual decision-making system for the evaluation of scientific activity on the basis of a multi-segment system]. *Neyrokomputery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers], no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

5. **Kuznetsova, T.I. and Tsaregorodtseva, M.G.** (2016). *Kompleksnaya otsenka kachestva izucheniya inostrannogo yazyka v vide summi additivnoy i multiplikativnoi svertoch otdelnykh pokazateley* [Comprehensive assessment of the quality of learning a foreign language in the form of a sum of additive and multiplicative convolutions of individual indicators]. *Trudy XXV mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye tekhnologii v zadachah upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii»* [Proceedings of the international conference «Modern technologies in control, automation and information processing problems»], Alushta, 2016, Technology, p. 208. (in Russian)
6. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vibor optimalnykh parametrov v zadachah s mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. M.: Nauka, 110 p.
7. Programmy razvitiya system organizatsii vozdušnogo dvizheniya Evropy i SSHA SESAR i NextGen: analiticheskiy obzor po materialam zarubezhnykh informatsionnykh istochnikov [Programs for the development of air traffic management systems in Europe and the US SESAR and NextGen: an analytical review on the materials of foreign information sources]. (2011). Ed. E.A. Fedosov. Moscow: GosNIIAS. 256 p. (in Russian)
8. **Lebedev, G.N., Malygin, V.B. and Mikhaylin, D.A.** (2017). *Postanovka i reshenie zadachi operativnoy korrektsii prileta i vyleta vozdušnykh sudov v rayone aerodroma s pomoschyu geneticheskogo algoritma* [The formulation and solution of the problem of the operational correction of the arrival and departure of aircraft in the area of the aerodrome with the help of a genetic algorithm]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 8–15. (in Russian)
9. **Lugovaya, A.V. and Konovalov, A.E.** (2017). *Sovmestnoe prinyatie resheniya o potokakh prileta i vyleta VS pri organizatsii vozdušnogo dvizheniya* [Joint decision-making on the arrival and departure flows in the organization of air traffic]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 8–15. (in Russian)
11. **Kulakov, Yu.A., Kogan, A.V. and Morozovskiy, T.O.** (2015). *Sposob organizatsii mnogoputevoy marshrutizatsii s pomoschyu modifitsirovannogo metoda vetvey i granits* [A way to organize multi-path routing using a modified branch and bound method]. *Visnik NTUU «KPI». Informatika, upravleniya ta obchislyvalna tekhnika* [Bulletin of NTUU «KPI». Computer Science, Management and Computing], no. 62, pp. 27–31. URL: <http://it-visnyk.kpi.ua> (available at: 28.08.2018). (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Georgiy N. Lebedev**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of the Automatic and Intellectual Management Systems, Moscow Aviation Institute (National Research University), [kaf301@mai.ru](mailto:kaf301@mai.ru).

**Vyacheslav B. Malygin**, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [mbv898@ya.ru](mailto:mbv898@ya.ru).

**Denis A. Mikhaylin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Research Officer, Main Research and Testing Center of Robotics of the Ministry of Defence of the Russian Federation, [tau\\_301@mail.ru](mailto:tau_301@mail.ru).

**Tan Byo**, Master's Degree Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), [tau\\_301@mail.ru](mailto:tau_301@mail.ru).

Поступила в редакцию  
Принята в печать

16.03.2018  
18.09.2018

Received  
Accepted for publication

16.03.2018  
18.09.2018

УДК 629. 73. 018. 7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-78-93

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ В ИСПЫТАНИЯХ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫХОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОНТАКТ С ВОЗДУШНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

С.В. НИКОЛАЕВ<sup>1</sup>, А.А. ТИХОНОВ<sup>1</sup>, Д.С. МЕРЕНЦОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>929 Государственный летно-испытательный центр МО РФ, г. Ахтубинск, Россия

В статье представлена методика определения в летных испытаниях вероятности выхода летательного аппарата в информационный контакт с воздушными объектами. В основе методики лежит опытно-теоретический метод испытаний, базирующийся на применении математического моделирования. Методика отличается от известных тем, что использует современные информационные технологии, и принятая в ней математическая модель реализована в виде программы для ЭВМ. Кроме того, нахождение данного показателя эффективности в летных экспериментах нецелесообразно из-за существенных ресурсных затрат. Данная методика пригодна для практических целей испытаний и позволяет определить показатель эффективности летательного аппарата при поиске воздушных объектов – вероятность выхода в информационный контакт с типовым воздушным объектом. Представленная программа для ЭВМ обеспечивает выполнение расчетов показателя выхода для различных значений и сочетаний, влияющих на результат факторов. Выполнено моделирование и получены вероятности выхода летательного аппарата в информационный контакт с типовыми воздушными объектами в заданных условиях. Представлены результаты исследований влияния на вероятность выхода в информационный контакт групп факторов: характеристик летательного аппарата, характеристик воздушного объекта и качество исходной информации о нем, условия поиска. В результате работы установлены основные закономерности при решении задачи выхода летательного аппарата в информационный контакт с воздушным объектом. Созданная в рамках методики программа для ЭВМ обладает современным графическим интерфейсом и позволяет сократить время, затрачиваемое исследователем на обработку результатов испытаний. Разработанная методика позволяет выполнить сравнительную оценку возможностей летательных аппаратов по обнаружению воздушных объектов в испытаниях.

**Ключевые слова:** летные испытания, обнаружение воздушных объектов, вероятность обнаружения, летательные аппараты.

### ВВЕДЕНИЕ

Результатом выхода летательного аппарата (ЛА) в информационный контакт (ИК) с воздушным объектом – целью является обнаружение его бортовыми средствами или визуально. В качестве показателя эффективности при этом целесообразно использовать вероятность выхода в ИК. Под выходом в ИК понимается такое взаимное положение ЛА и цели, при котором обеспечивается обнаружение цели бортовыми средствами ЛА.

В настоящее время при проведении летных испытаний (ЛИ) вероятность выхода в ИК не определяется по ряду причин и принимается равной единице. Нахождение данного показателя непосредственно в натурных работах крайне затруднено из-за большого количества потребных затрат на организацию и выполнение летных экспериментов, поэтому для определения вероятности выхода в ИК необходимо использовать метод моделирования, неплохо зарекомендовавший себя в ходе летных испытаний [1–4]. В данной работе в рамках метода принимается математическая модель для расчета вероятности выхода, которая предусматривает учет точностных характеристик начальной информации о цели, ошибок ее передачи, времени старения информации, маневра цели, поисковых возможностей ЛА и т. д. Кроме того, на языке программирования C# [5–8] создается программная реализация модели, использующая при расчетах исходные данные, в том числе полученные в испытательных полетах. Это позволяет выполнять расчеты при любом сочетании и количестве учитываемых характеристик.

Существующие методики определения показателей эффективности при обнаружении объектов [9–11] не подходят для получения вероятностей по выходу ЛА в ИК с воздушным объектом, кроме того, они не используют возможностей современных компьютерных технологий [12, 13]. В этой связи разработка нового, современного алгоритмического, программного и методического обеспечения [1, 3, 4] является актуальной задачей.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для успешного решения поставленной задачи – определения эффективности выхода ЛА в информационный контакт с воздушным объектом необходимо разработать новую методику, позволяющую в процессе летных испытаний ЛА получать вероятности его выхода в информационный контакт ( $P_{\text{вых}}^{\text{ИК}}$ ) с воздушным объектом.

В рамках методики должна быть разработана математическая модель и ее программная реализация для ЭВМ, позволяющая рассчитать вероятность выхода ЛА в информационный контакт с целью по исходным данным, полученным в ЛИ.

Существующий подход к оценке показателя  $P_{\text{вых}}^{\text{ИК}}$  только в натурном эксперименте (фактическое число успешных выходов в ИК) требует существенных временных и ресурсных затрат и недостаточно достоверен ввиду малого количества реализаций. Поэтому в летных испытаниях оценить вероятность выхода в зависимости от условий полета, параметров движения и взаимного положения ЛА и цели невозможно.

В этой связи показатель вероятности выхода в ИК лучше всего определять, используя математическое моделирование, поскольку исследователь сам может варьировать в модели параметры, влияющие на искомый показатель. Такой подход обеспечивает возможность получения вероятности выхода в ИК при любых внешних условиях.

В предлагаемой методике определения эффективности ЛА при выходе в ИК используются известные методы теории вероятностей – «прямолинейные полосы» и «сетки рассеивания» [14].

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Математическая модель, используемая в данной методике, базируется на известных подходах к моделированию поиска объектов [10, 11, 14, 15] и создана с использованием предложенного в [10, 11, 14, 15] математического аппарата. Указанная модель содержит ряд наработок, используемых при создании моделирующих комплексов и стендов [12, 13]. В случаях, когда требуется уточнение модели в части аэродинамических характеристик конкретного типа ЛА, используются методы идентификации аэродинамических характеристик ЛА по результатам натурных работ [19–21]. При необходимости более подробного анализа влияния различных факторов на вероятность выхода ЛА в ИК использованы методы, подробно изложенные в [10, 11].

В настоящей методике предложен следующий алгоритм определения вероятности выхода в ИК:

- определение (построение) области возможных положений цели (ОВПЦ);
- определение (построение) поисковой зоны ЛА;
- сопоставление поисковой зоны с ОВПЦ и вычисление вероятности выхода в ИК.

Вычисление  $P_{\text{вых}}$  выполняется с помощью численного интегрирования с применением так называемых «сеток рассеивания» [16–18]. Сетка рассеивания в данном случае представляет собой систему линий, делящих ОВПЦ на отдельные ячейки, вероятность попадания в которые определяется в зависимости от расположения ячейки относительно центра рассеивания. Для

практических расчетов могут использоваться табличные значения вероятности попадания в ячейки квадратной сетки соответствующих размеров [14–16].

Для определения (построения) ОВПЦ сначала находим среднее квадратичное отклонение курсового угла цели, которое берется из ЛЭ, а при отсутствии необходимого числа ЛЭ может быть рассчитано.

Основные формулы, составляющие математическую модель (ММ), представлены ниже.

$$\begin{aligned}\Delta\psi_{\pi} &= \frac{L}{R_3 \cos \phi}; \\ \bar{f}_1(\bar{\psi}_1) &= \frac{1}{2(\bar{b}_1 - \bar{a}_1)} \left[ \Phi\left(\frac{\bar{b}_1 - \bar{\psi}_1}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\bar{a}_1 - \bar{\psi}_1}{\sqrt{2}}\right) \right]; \\ \bar{a}_1 &= \frac{-\Delta\psi_{\text{м}}}{\sigma\psi_0}, \quad \bar{b}_1 = \frac{\Delta\psi_{\text{м}}}{\sigma\psi_0}; \\ \sigma\psi_1 &= (1 / \bar{f}_1(0) \sqrt{2\pi}) \sigma\psi_0; \\ \bar{f}_2(\bar{\psi}_2) &= \frac{1}{2(\bar{b}_2 - \bar{a}_2)} \left[ \Phi\left(\frac{\bar{b}_2 - \bar{\psi}_2}{\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{\bar{a}_2 - \bar{\psi}_2}{\sqrt{2}}\right) \right]; \\ \bar{a}_2 &= \frac{-\Delta\psi_{\pi}}{\sigma\psi_1}, \\ \bar{b}_2 &= \frac{\Delta\psi_{\pi}}{\sigma\psi_1}; \\ \sigma\psi_2 &= (1 / \bar{f}_2(0) \sqrt{2\pi}) \sigma\psi_1,\end{aligned}$$

где  $\bar{\psi}$  – угол курса, град.;

$\bar{f}_1(\bar{\psi}_1)$  – нормированная функция плотности распределения курса;

$\sigma\psi_1$  – среднее квадратическое отклонение (СКО) курса в композиции законов распределения начального курса и его изменений при маневре цели;

$\bar{f}_2(\bar{\psi}_2)$  – нормированная функция плотности распределения курса;

$\sigma\psi_2$  – результирующее СКО курса (в композиции полученного закона распределения и закона изменений курса при передаче информации);

$\pm \Delta\psi_{\pi}$  – максимальная ошибка в передаче информации о цели;

$R_3$  – радиус Земли (6371 км);

$L$  – расстояние по параллели между передающим и принимающим информацию;

$\phi$  – широта местности, где выполняется выход в ИК;

$\pm \Delta\psi_{\text{м}}$  – максимальные изменения курса при маневрировании цели;

$\Phi$  – табличная функция Лапласа;

$\sigma\psi_0$  – СКО начального курса цели.

Этапы алгоритма схематично показаны на рис. 1–3, при этом принимается следующее.

ОВПЦ строится с учетом СКО курса и скорости цели, полагая, что информация о цели получена при нахождении ее в точке О (рис. 1). Относительно генерального направления полета цели строятся курсовые лучи в диапазоне  $\pm 3$  СКО курсового угла.

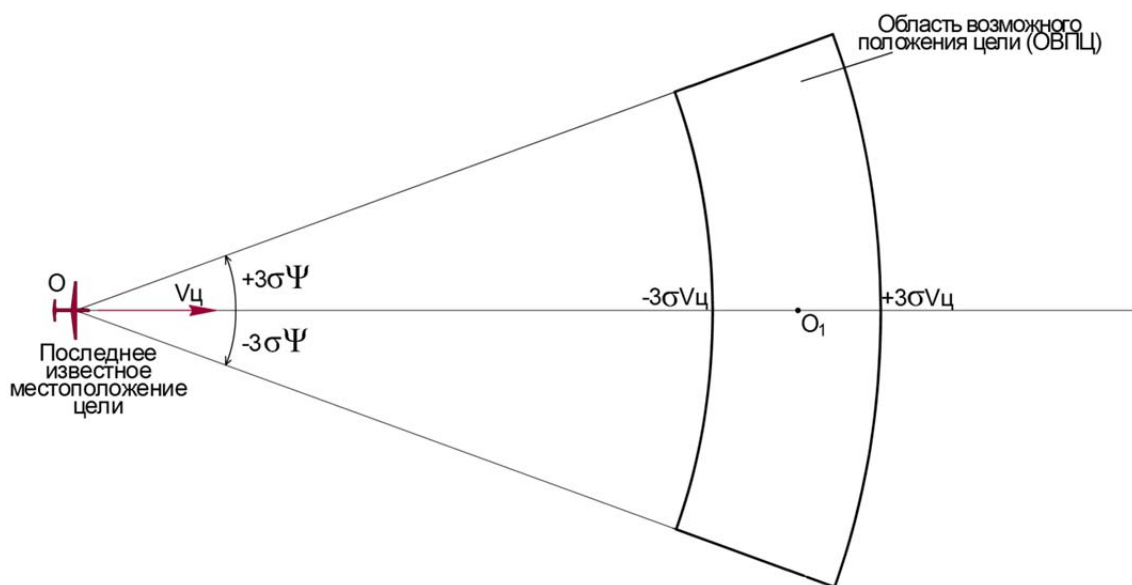


Рис. 1. Схема построения ОВПЦ

Fig. 1. Scheme of the construction of the target possible position

Поисковая зона ЛА строится с учетом дальности обнаружения цели (в зависимости от ЭПР) и угловых размеров зоны обзора БРЛС по азимуту. Края зоны обрезают (рис. 2) из такого расчета, чтобы цель находилась в поисковой зоне заданное количество времени, что связано с необходимостью ее обнаружения, опознавания и постановкой на сопровождение.

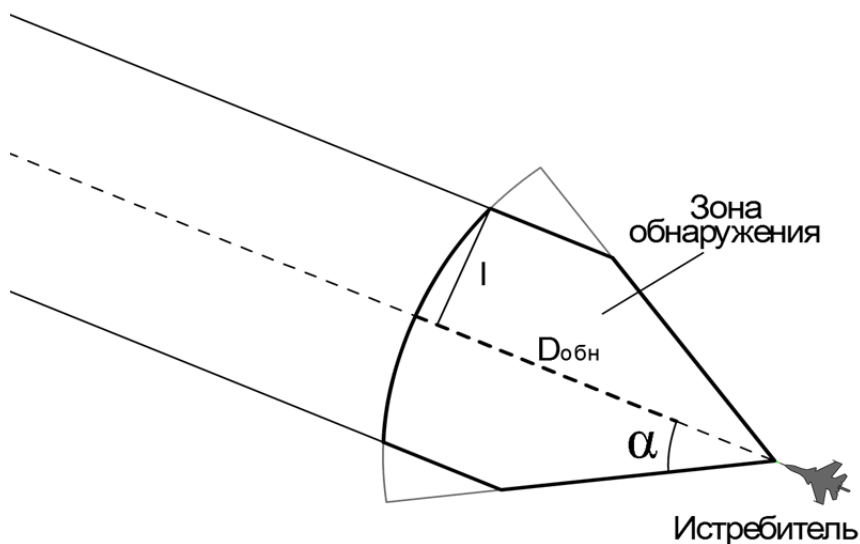


Рис. 2. Схема построения поисковой зоны

Fig. 2. Scheme of construction of the search area

На ОВПЦ наносят линию пути ЛА соответственно линии краев поисковой зоны (зона «перекрытия»). Таким образом, получают обследованную часть ОВПЦ (рис. 3). При отсутствии ограничений ЛА по курсовому углу цели вероятность выхода определяют суммированием элементарных вероятностей (табличных значений вероятностей ячеек сетки рассеивания), принадлежащих обследованной части ОВПЦ.

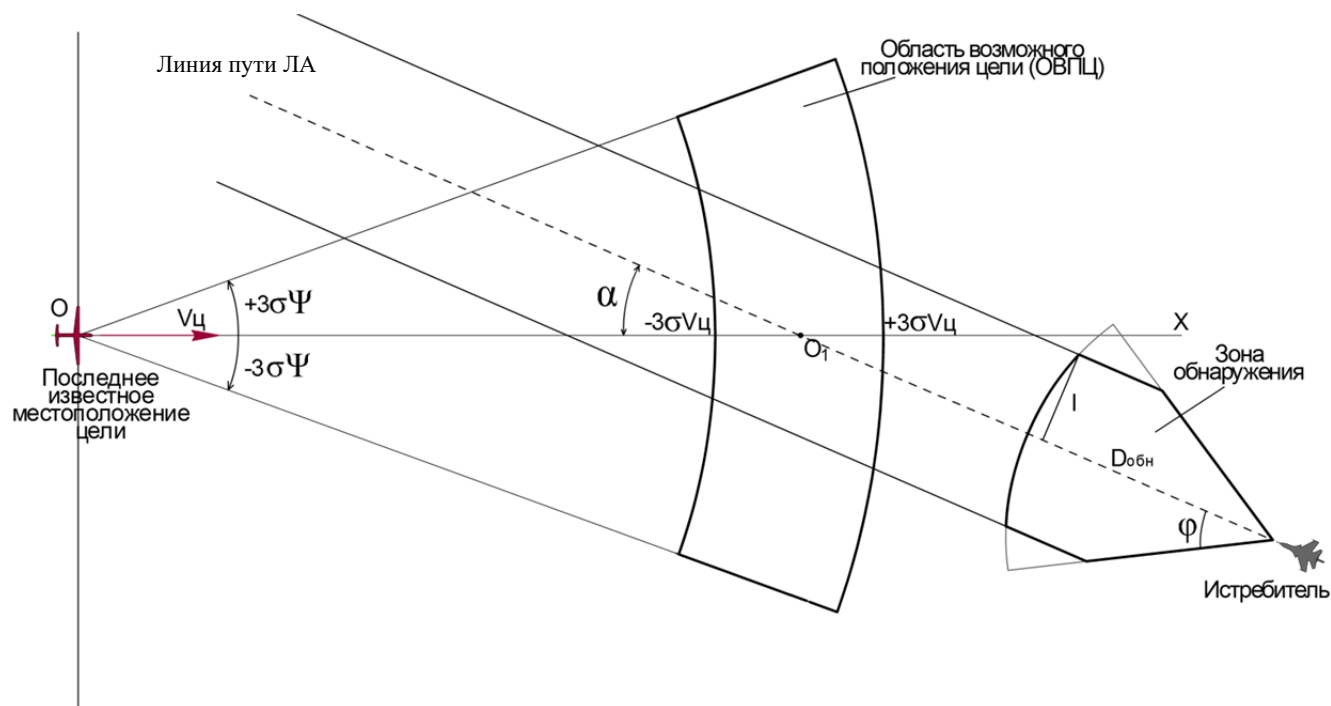


Рис. 3. Схема построения зоны перекрытия  
Fig. 3. The scheme for constructing the overlap zone

Далее ОВПЦ представляют в виде криволинейной сетки рассеивания (рис. 4) с ячейками размерами  $0,01\sigma_{\psi 2}$  на  $0,01\sigma_{V_{ц}}$ . ОВПЦ строится в диапазоне  $-3\cdot\sigma_{\psi 2} \dots 3\cdot\sigma_{\psi 2}$ ,  $-3\cdot\sigma_{V_{ц}} \dots 3\cdot\sigma_{V_{ц}}$  по нормальному закону распределения относительно математического ожидания положения цели (точка  $m_{O1} = V_{ц}\tau_{в}$  – математическое ожидание координат цели через время выхода в точке  $O_1$ ), через время  $\tau_{в}$ , полагая, что информация о цели получена при нахождении ее в точке O.

$$\tau_{в} = -\frac{D_n - D_{обн}}{\dot{D}_{ср}},$$

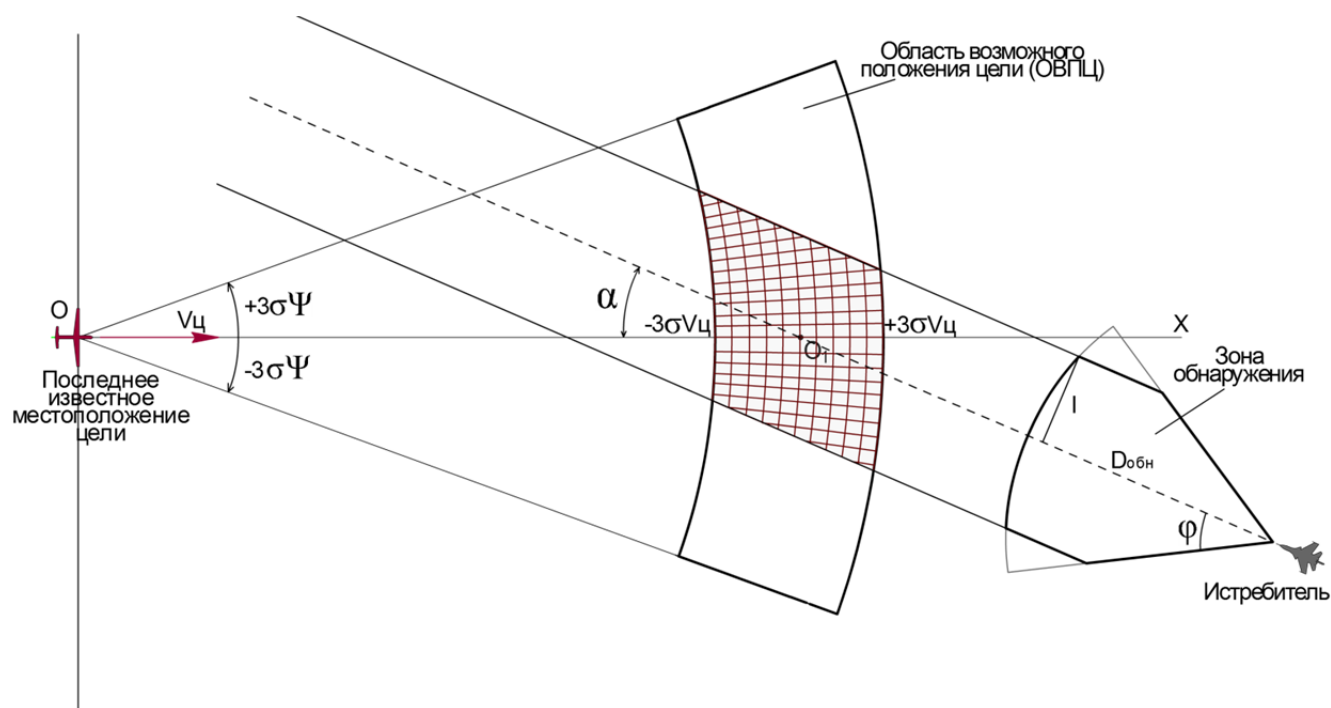
где  $D_{обн}$  – дальность обнаружения цели (из ЛЭ);  
 $D_n$  – начальная дальность между истребителем и целью;  
 $\dot{D}_{ср}$  – средняя скорость сближения при поиске.

Определение половины ширины поля обзора ведущей информационной системы (ВИС) выражается следующим образом.

$$l = (D - t_{обн} \cdot V_{ср}^{истр}) \cdot \operatorname{tg} \phi,$$

где  $D$  – дальность обнаружения цели;  
 $t_{обн}$  – время потребное для обнаружения цели;  
 $V_{ср}^{истр}$  – средняя скорость истребителя;  
 $\phi$  – половина угла поля обзора ВИС.

Вероятность выхода ЛА в ИК с целью определяется после сопоставления поисковой зоны с ОВПЦ, построенных в одном и том же масштабе. ОВПЦ строится один раз и используется для различных расчетных условий. Масштаб поисковой зоны меняется в зависимости от  $\tau_p$ .



**Рис. 4.** Общая схема определения вероятности выхода в ИК  
**Fig. 4.** General scheme for determining the probability of an exit into an information contact

Принадлежность конкретной ячейки к обследованной зоне можно определить геометрически по критерию ее нахождения между линиями, характеризующими границы этой зоны.

Для каждой ячейки существует вероятность нахождения в ней цели, которая получается в результате произведения вероятностей нахождения цели в заданных интервалах по  $\psi$  или  $V_{ц}$ . Сумма вероятностей нахождения цели во всех ячейках ОВПЦ

$$P_{ОВПЦ} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_{ij} = 0,994,$$

где  $P_{ij}$  – вероятность нахождения цели в конкретной ячейке.

Искомая вероятность выхода в ИК определяется суммированием элементарных вероятностей (табличных значений вероятностей ячеек сетки рассеивания), принадлежащих обследованной части ОВПЦ.

$$P_{вых} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_{ij}^*,$$

где  $P_{ij}^*$  – вероятность нахождения цели в конкретной ячейке, попавшей в обследованную зону.

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для расчета показателя эффективности выхода ЛА в информационный контакт с воздушным объектом и представления результатов его испытаний в оптимальном для работы испытателя виде, разработана программа для ЭВМ, в основу которой легла математическая модель, описанная выше.

Программа расчета вероятности выхода в информационный контакт с воздушным объектом

**Исходные данные**

☐ С учетом маневра цели (известно начальное СКО, далее расчет)  
☐ Итоговое СКО курса цели (полученное в испытаниях)

200 L - расстояние параллели между передающим и принимающим информацию, км  
 60 Фи - широта местности, где выполняется боевая задача  
 5 дельта ПСИм - максимальные изменения курса при маневрировании цели  
 1.6 СКО ПСИО  
 300 V цели, км/ч  
 50 СКО V цели, км/ч

0.5 время полета истребителя к цели, ч  
 1 алфа - угол полета истребителя, относительно цели  
 150 Dob - дальность обнаружения локатором, км  
 600 V истребителя, км/ч  
 15 половина угла обзора локатора  
 20 время обнаружения цели, с

**Промежуточные результаты расчетов**

20.415747489688 SKO2  
 0.9946037034617 вероятность нахождения цели в ОВПЦ -3°СКО...+3°СКО  
 0 Dmin  
 78.592367329647 Ширина поля обзора локатора  
 300 Dmax

Расчет  
 Экспорт в Excel  
 Графическая интерпретация

0.445948146590092

Вероятность выхода в ИК (пересечения полосы обзора и ОВПЦ)

Рис. 5. Интерфейс разработанной программы  
Fig. 5. The developed program interface

Программа имеет современный многооконный графический интерфейс и обеспечивает выполнение следующих функций:

- расчет вероятности выхода в информационный контакт с воздушным объектом;
- расчет вспомогательных параметров, необходимых для качественного анализа результатов моделирования;
- экспорт результатов расчетов в таблицу Excel;
- графическая интерпретация процесса выхода в ИК.

Программная реализация используется в программно-аппаратном комплексе для исследований и оценивания в испытаниях характеристик авиационных комплексов [22].

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В табл. 1 представлены некоторые результаты моделирования вероятности выхода ЛА в ИК с некоторыми типовыми воздушными объектами (ТВО). Исходные данные по характеристикам ТВО взяты по материалам открытых источников в сети Интернет.

Таблица 1  
Table 1

Результаты расчета вероятности выхода ЛА в ИК с типовыми целями  
The results of calculating the probability of an aircraft exit into information contact with typical purposes

|                                               | Выход ЛА в ИК<br>с целью типа <b>F-35</b> | Выход ЛА в ИК<br>с целью типа <b>B-1B</b> | Выход ЛА в ИК<br>с целью типа <b>Tomahawk</b> |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Исходные данные по цели</b>                |                                           |                                           |                                               |
| Скорость                                      | $V_{F-35} = 1000 \pm 200$ км/ч            | $V_{B-1B} = 1100 \pm 300$ км/ч            | $V_{Том} = 880 \pm 30$ км/ч                   |
| Изменение курса                               | $\Psi = \Psi_0 \pm 15^\circ$              | $\Psi = \Psi_0 \pm 15^\circ$              | $\Psi = \Psi_0 \pm 30^\circ$                  |
| ЭПР                                           | $S_{F-35} = 3,4$                          | $S_{B-1B} = 13$                           | $S_{Том} = 0,1$                               |
| Дальность обнаружения                         | $D_{обн F-35} = 162$ км                   | $D_{обн B-1B} = 318$ км                   | $D_{обн Том} = 28$ км                         |
| <b>Параметры решения задачи</b>               |                                           |                                           |                                               |
| Время полета ЛА до цели ( $t_{вых}$ )         | 0,3 ч                                     | 0,3 ч                                     | 0,3 ч                                         |
| Угол полета цели относительно ЛА ( $\alpha$ ) | 0                                         | 0                                         | 0                                             |
| Половина угла обзора ВИС ( $\phi$ )           | 30 град.                                  | 30 град.                                  | 30 град.                                      |
| Время обнаружения ( $t_{обн}$ )               | 20 с                                      | 20 с                                      | 20 с                                          |
| Скорость полета ЛА                            | 1000 км/ч                                 | 1000 км/ч                                 | 1000 км/ч                                     |
| <b>Вероятность выхода</b>                     | <b>0,57</b>                               | <b>0,79</b>                               | <b>0,07</b>                                   |

Кроме того, на рис. 6–11 показаны результаты исследований влияния на вероятность выхода в ИК параметров различных факторов и их сочетаний. Эти рисунки иллюстрируют зависимость искомого показателя от наиболее важных параметров, характеризующих условия решения задачи: СКО курса цели, скорости цели, СКО скорости цели, зоны обзора ЛА, дальности обнаружения. При моделировании влияния параметров на вероятность выхода в ИК использован следующий набор исходных данных: СКО  $\Psi = 15^\circ$ ,  $V_{ц} = 600$  км/ч, СКО  $V_{ц} = 50$  км/ч,  $t_{вых} = 0,3$  ч,  $\phi = 15^\circ$ ,  $t_{обн} = 20$  с,  $D_{обн} = 150$  км.

В результате исследований установлены следующие основные закономерности при решении задачи выхода в ИК.

Изменение СКО курса цели существенно влияет на вероятность успешного выхода в ИК, поскольку приводит к значительному увеличению размеров ОВПЦ. Разработанная модель позволила получить зависимость  $P_{вых}$  от изменения СКО курса цели в широком диапазоне (от 0 до 60 градусов). Видно (рис. 6), что большие значения СКО курса цели приводят к снижению  $P_{вых}$  до недопустимо малого уровня ( $< 0,5$ ), однако следует отметить, что такие значения могут быть получены либо при активном маневрировании цели, либо при грубых измерениях ее курса. В то же время минимальное значение СКО курса цели приводит к тому, что вся ОВПЦ может быть накрыта поисковой зоной ЛА, то есть  $P_{вых} \rightarrow 1$ .

Увеличение скорости цели (рис. 7) приводит к значительному снижению  $P_{вых}$ . Это обусловлено тем, что при увеличении скорости цели в еще большей степени на ОВПЦ будет сказываться СКО курса цели (чем больше скорость цели, тем больше удаление от начальной точки и больше расхождение по курсу, даже при одном значении СКО курса).

При увеличении СКО скорости цели (рис. 8) (увеличение ошибки измерения или диапазона скоростей полета ВЦ) происходит снижение  $P_{вых}$ , но в меньшей степени, чем при увеличении самой скорости цели или СКО ее курса. При этом видно, что даже точное измерение скорости цели не приводит к высокой вероятности выхода в ИК. Это объясняется тем, что в условиях решаемой задачи, в любых условиях ЛА проходит через центр ОВПЦ в переднюю полусферу цели, что соответствует наиболее вероятному положению цели в пространстве.



Рис. 6. Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
Fig. 6. The results of modeling the probability of an exit into information contact

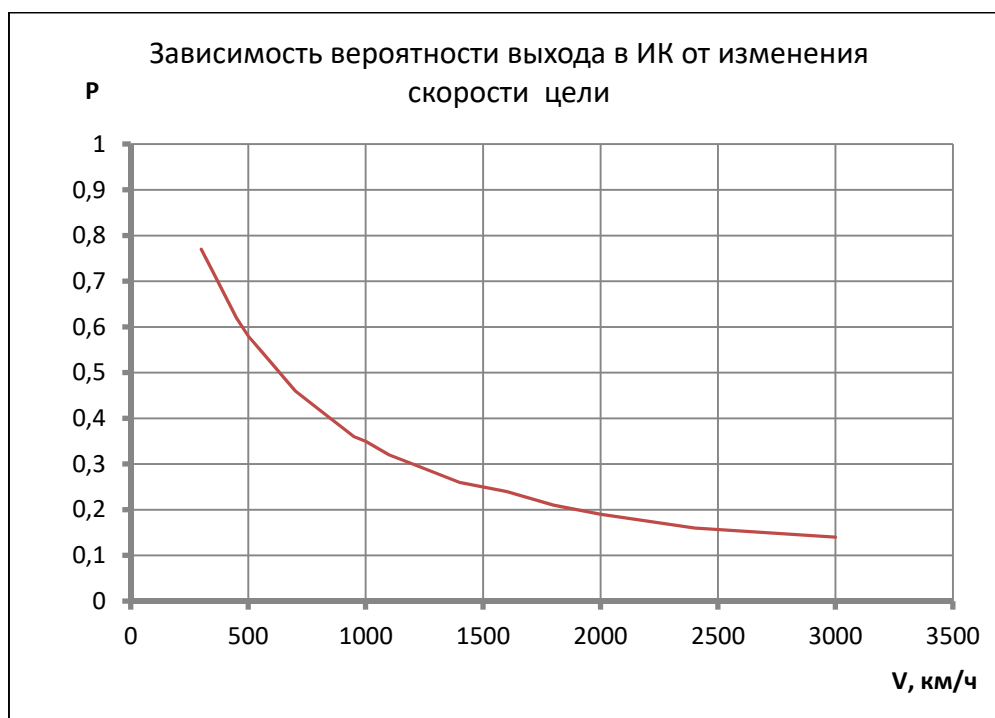
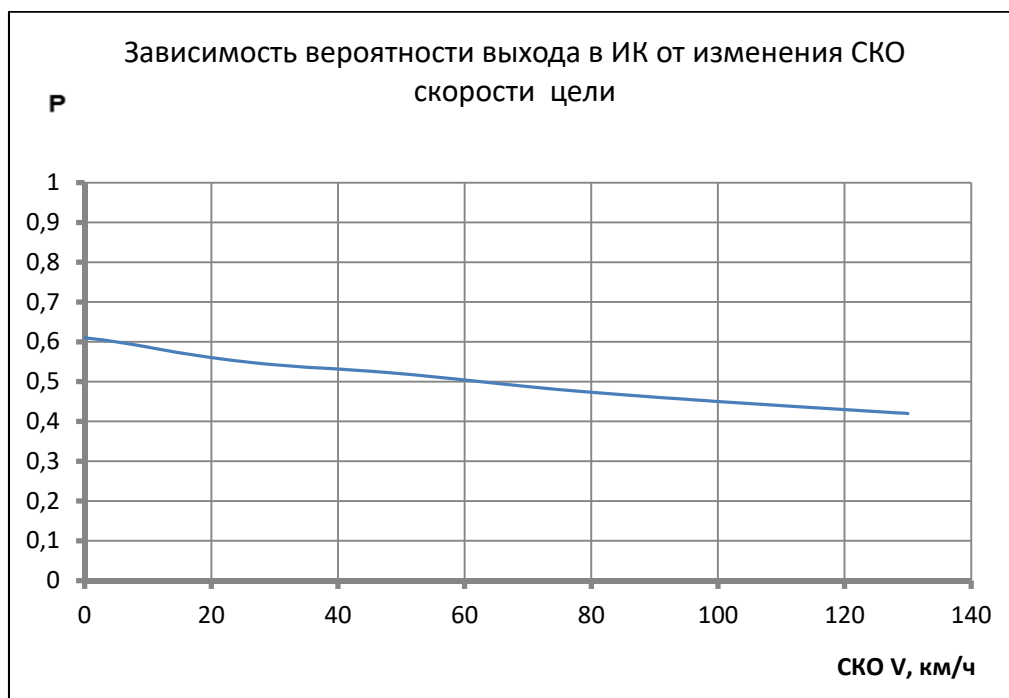
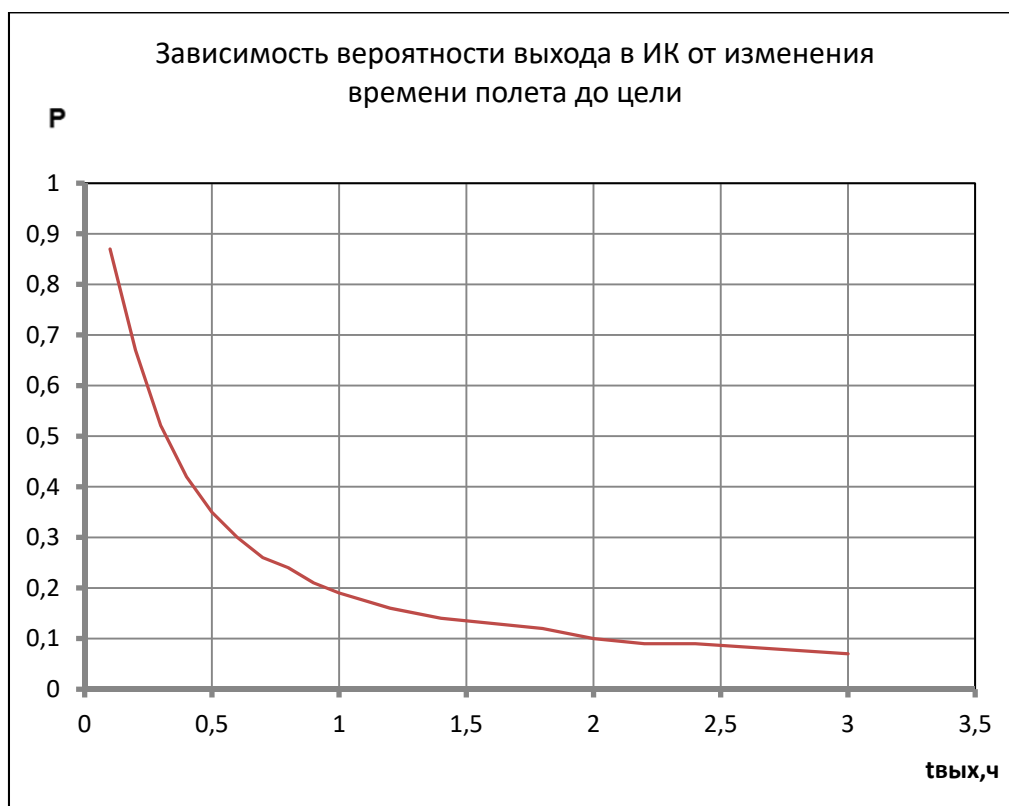


Рис. 7. Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
Fig. 7. The results of modeling the probability of an exit into information contact



**Рис. 8.** Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
**Fig. 8.** The results of modeling the probability of an exit into information contact



**Рис. 9.** Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
**Fig. 9.** The results of modeling the probability of an exit into information contact

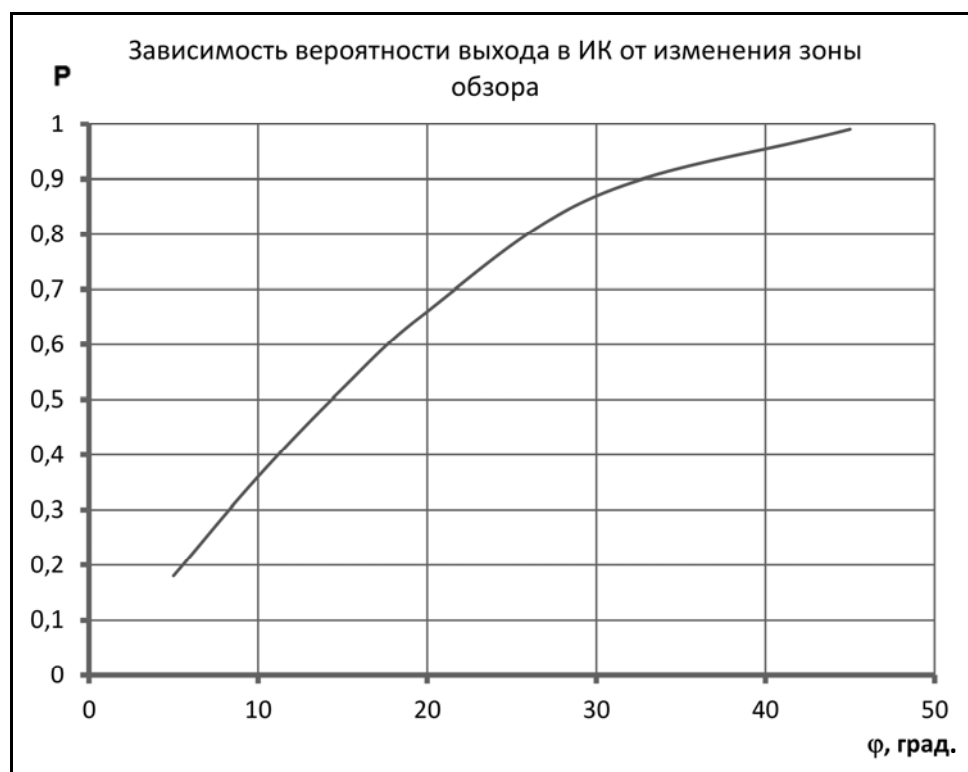


Рис. 10. Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
Fig. 10. The results of modeling the probability of an exit into information contact

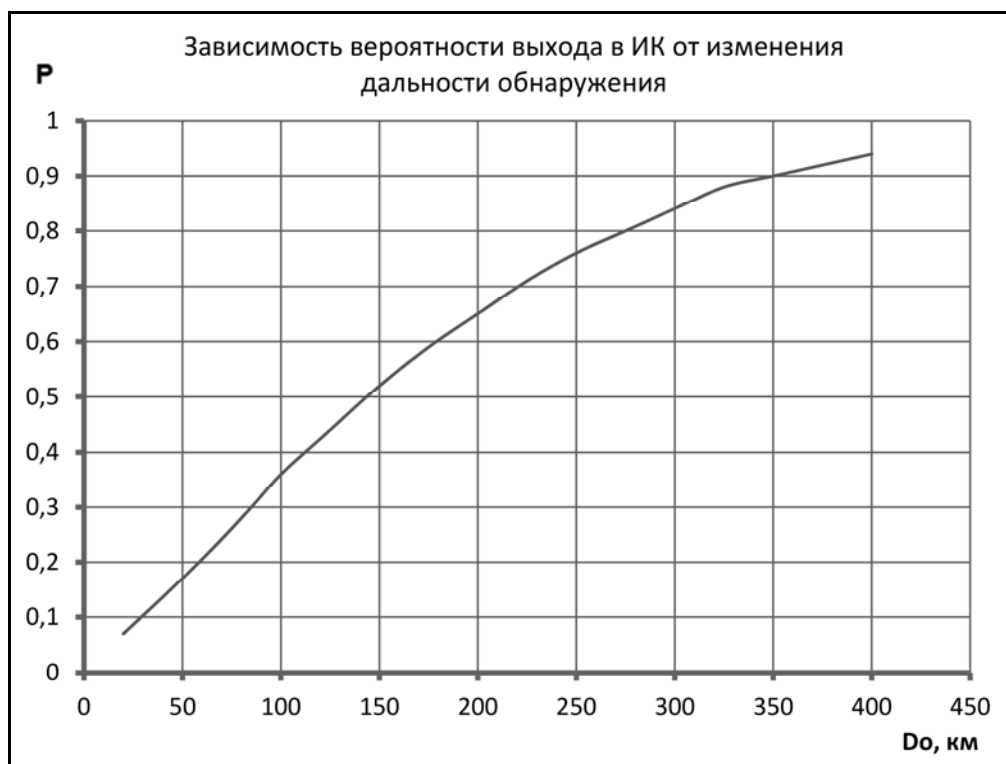


Рис. 11. Результаты моделирования вероятности выхода в информационный контакт  
Fig. 11. The results of modeling the probability of an exit into information contact

Существенное влияние на  $P_{\text{вых}}$  оказывает увеличение времени полета ЛА до цели ( $t_{\text{вых}}$ ). Из графика видно (рис. 9), что при наименьших значениях времени полета до цели  $P_{\text{вых}}$  имеет наибольшее значение. При больших значениях  $t_{\text{вых}}$  исследуемая зависимость асимптотически приближается к 0, но не приравнивается к нему. Объясняется это тем, что  $P_{\text{вых}}$  можно представить графически пересечением (наложением) ОВПЦ и полосой поиска истребителя. Полоса поиска является постоянной, а ОВПЦ со временем увеличивается в площади и расходится по курсу. При этом полоса поиска всегда проходит через центр ОВПЦ, поэтому даже при больших значениях  $t_{\text{вых}}$  искомая вероятность не будет равна 0.

Расширение ширины зоны обзора (угла обзора) приводит к существенному повышению  $P_{\text{вых}}$  (рис. 10). При больших значениях угла зоны обзора ( $> 30$  градусов) и достаточной дальности обнаружения можно добиться  $P_{\text{вых}}$  близкой к 1, что соответствует полному (почти полному) накрытию ОВПЦ полосой обзора. Однако угол обзора считается постоянным, а значит и полоса обзора имеет постоянную величину для конкретного типа ВЦ, а ОВПЦ для одной цели меняется в течение времени выхода, и в конечном счете решающее значение будет иметь  $t_{\text{вых}}$ .

Влияние дальности обнаружения (рис. 11) аналогично расширению зоны обзора, т. к. обе эти величины определяют ширину зоны поиска, которая является постоянной.

Таким образом, установлено, что на показатель  $P_{\text{вых}}$  оказывают влияние три группы факторов: характеристики ЛА, характеристики цели и качество исходной информации о ней, условия поиска.

Положительное влияние на  $P_{\text{вых}}$  оказывают характеристики ЛА и благоприятные условия поиска, т. е. большая дальность обнаружения и большая зона обзора, малое время выхода в район предполагаемого положения цели. Отрицательное влияние оказывают маневренные характеристики цели или характер ее действий, качество информации, по которой наводится ЛА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет существенно повысить качество испытаний, сократить время на анализ полученных материалов, проводить исследования эффективности летательных аппаратов.

Разработана новая методика расчета вероятности выхода в информационный контакт с воздушными объектами. С помощью программной реализации получены вероятности выхода ЛА в информационный контакт с воздушными объектами типа F-35, B-1B, Tomahawk. При принятых условиях моделирования вероятности составили 0,57, 0,79, 0,07 соответственно. Такой подход позволяет определить важные показатели эффективности ЛА и оценить влияние на эти показатели различных факторов.

Представлены результаты исследований по определению зависимости вероятности выхода в ИК от наиболее важных параметров, характеризующих условия решения этой задачи.

Для повышения эффективности ЛА при поиске цели по разовой информации необходимо иметь поисковые бортовые средства, обеспечивающие максимальную дальность и ширину зоны обзора, необходимо обеспечить наименьшее время выхода в район ОВПЦ, что достигается выбором района патрулирования (барражирования) на наиболее вероятных направлениях появления цели.

Методика может быть использована на этапе государственных летных испытаний в интересах оценки возможностей ЛА, а программная реализация при моделировании различных ситуаций по выходу в информационный контакт с воздушными объектами в широком диапазоне изменения внешних условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николаев С.В.** Определение в испытаниях вероятности обнаружения наземных объектов с борта летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 131–144.
2. **Бобков А.Е., Леонов А.В.** Процедурная реконструкция территорий на виртуальном глобусе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 11. С. 10–17.
3. **Корсун О.Н., Семенов А.В.** Методика определения характеристик устойчивости и управляемости самолета М-55 «Геофизика» // Полет. 2006. № 2. С. 23–29.
4. **Пушков С.Г., Горшкова О.Ю., Корсун О.Н.** Математические модели погрешностей бортовых измерений скорости и угла атаки на режимах посадки самолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 66–70.
5. **Шилдт Г.** Полный справочник по C#: пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 752 с.
6. **Шилдт Г.** C# 4.0: полное руководство: пер. с англ. М.: Вильямс, 2011. 1056 с.
7. **Уотсон К.** Visual C# 2010: полный курс: пер. с англ. / К. Нейгел, Я.Х. Педерсен, Дж. Д. Рид, М. Скиннер. М.: Диалектика, 2010. 960 с.
8. **Петцольд Ч.** Программирование с использованием Microsoft Windows Forms. Мастер-класс: пер. с англ. СПб.: Питер, 2006. 432 с.
9. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: КноРус, 2010. 192 с.
10. **Абчук В.А., Суздаль В.Г.** Поиск объектов. М.: Советское радио, 1977. 336 с.
11. **Арбузов И.В., Болховитинов О.В.** Боевые авиационные комплексы и их эффективность. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 224 с.
12. **Себряков Г.Г.** Принципы создания универсальных систем визуализации комплексов моделирования для задач обучения, ситуационного анализа и тренажа / И.Б. Татарников, Ю.С. Тюфлин, С.В. Скрыбин, А.В. Тарновский // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 3. С. 48–50.
13. **Себряков Г.Г., Желтов С.Ю., Татарников И.Б.** Компьютерные технологии создания геопространственных трехмерных сцен, использующих комплексирование географической информации и синтезированных пользовательских данных // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 8. С. 2–10.
14. **Скопец Г.М.** Внешнее проектирование авиационных комплексов: Методологические аспекты. М.: URSS, 2017. 344 с.
15. **Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / под ред. Федосова. 2-е изд., стереотип. М.: Дрофа, 2004. 816 с.**
16. **Абергауз Г.Г.** Справочник по вероятностным расчетам / А.П. Тронь, Ю.И. Копенкин, И.А. Коровина. М.: Воениздат, 1970. 536 с.
17. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
18. **Мильграмм Ю.Г.** Таблицы и графики для вероятностных расчетов. Ч. 1. М.: ВВИА, 1974. 381 с.
19. **Корсун О.Н., Поплавский Б.К.** Структура методологии идентификации математических моделей самолетов по результатам летных испытаний // Авиационные технологии XXI века. IX международный научно-технический симпозиум ASTEC'07. 2007.
20. **Овчаренко В.Н.** Адаптивная идентификация параметров в динамических и статических системах // Автоматика и телемеханика. 2011. № 3. С. 113–123.
21. **Корсун О.Н., Николаев С.В.** Идентификация аэродинамических коэффициентов самолетов в эксплуатационном диапазоне углов атаки // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 9. С. 3–10.

**22. Николаев С.В., Снегирева И.В.** Программно-аппаратный комплекс для исследований и оценивания в испытаниях характеристик авиационных комплексов // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 3. С. 22–36.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Николаев Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-испытательного отдела 929 Государственного летно-испытательного центра МО РФ, nikozavr1978@yandex.ru.

**Тихонов Альберт Александрович**, инженер-испытатель научно-испытательного отдела 929 Государственного летно-испытательного центра МО РФ, nikozavr1978@yandex.ru.

**Меренцов Дмитрий Сергеевич**, инженер-испытатель научно-испытательного отдела 929 Государственного летно-испытательного центра МО РФ, nikozavr1978@yandex.ru.

## DEFINITION IN TESTING FOR THE PROBABILITY OF EXIT OF THE AIRCRAFT IN INFORMATIONAL CONTACT WITH AIR OBJECTS

**Sergey V. Nikolaev<sup>1</sup>, Albert A. Tikhonov<sup>1</sup>, Dmitry S. Merencov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>929 State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Akhtubinsk, Russia

### ABSTRACT

The article presents a methodology for determining the probability of aircraft information contacting airborne objects within flight test procedures. The methodology is based on the experimental-theoretical test method, based on the application of mathematical modeling. The technique differs from the known ones in that it uses modern information technologies, and the adopted mathematical model is implemented in the form of a computer program. In addition, detecting the given performance indicator in flight experiments is inappropriate because of significant resource costs. This technique is suitable for practical testing purposes and allows determining the aircraft efficiency index when searching air objects – the probability of an information contact with a typical air facility. The presented computer program provides the performance of calculations of the output index for different values and combinations of factors influencing the result. The simulation was performed and the probabilities of the aircraft information contact with typical airborne objects under given conditions were obtained. The results of the influence research on the probability of groups of factors outlet into information contact: the aircraft and the air object characteristics, the quality of the initial information about it, search conditions are presented. As a result of the work, the main regularities are established when solving the problem of the aircraft information contact with an air object. The computer program created within the methodology framework has a modern graphical interface and allows reducing the time spent by the researcher on the processing of test results. The developed technique allows performing a comparative assessment of the aircraft capabilities to detect airborne objects in tests.

**Key words:** flight tests, detection of airborne objects, detection probability, aircraft.

### REFERENCES

1. **Nikolaev, S.V.** (2017). *Opreделение v ispytaniyakh veroyatnosti obnaruzheniya nazemnykh obektov s borta letatel'nogo apparata* [Determination in the tests of the probability of detecting ground objects from the aircraft]. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 5, pp. 131–144. (in Russian)
2. **Bobkov, A.E. and Leonov, A.V.** (2015). *Procedurnaya rekonstruktsiya territorij na virtualnom globuse* [Procedural reconstruction of territories on a virtual globe]. *Vestnik kompyuternikh i informatsionnikh tekhnologiy* [Herald of computer and information technologies], no. 11, pp. 10–17.
3. **Korsun, O.N. and Semenov, A.V.** (2006). *Metodika opredeleniya kharakteristik ustoychivosti i upravlyaemosti samoleta M-55 «Geofizika»* [Methodology for determining the stability and handling characteristics of the M-55 Geophysics aircraft]. *Polet* [Flight], 2006, no. 2. pp. 23–29.

4. **Pushkov, S.G., Gorshkova, O.Yu. and Korsun, O.N.** (2013). *Matematicheskie modeli pogreshnostey bortovykh izmereniy skorosti i ugla ataki na rezhimakh posadki samoleta* [Mathematical models of errors in on-board measurements of speed and angle of attack on aircraft landing modes]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], no. 8, pp. 66–70. (in Russian)
5. **Shildt, G.** (2006). *Polnyy spravochnik po C#* [Full reference on C #]. *Per. s angl.* [Transl. from English]. Moscow: Williams, 752 p. (in Russian)
6. **Shildt, G.** (2011). *C# 4.0 [C # 4.0]. Polnoe rukovodstvo* [A Complete Guide]. *Per. s angl.* [Transl. from English]. Moscow: Williams, 1056 p. (in Russian)
7. **Watson, K., Nagel, C., Pedersen, J.H., Reed, J.D. and Skinner, M.** (2010). *Visual C# 2010* [Visual C # 2010]. *Polnyy kurs* [Full Course]. *Per. s angl.* [Transl. from English]. Moscow: Dialectics, 960 p. (in Russian)
8. **Pettsold, Ch.** (2018). *Programmirovaniye s ispolzovaniyem Microsoft Windows Forms. Master-klass* [Programming with Microsoft Windows Forms. Master Class]. *Per. s angl.* [Transl. from English]. St. Petersburg: Piter, 2006. 432 p.
9. **Venttsel E.S.** (2010). *Issledovaniye operatsyy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Research of operations: tasks, principles, methodology]. Moscow: Knorus, 192 p. (in Russian)
10. **Abchuk, V.A. and Suzdal, V.G.** (1977). *Poisk obektov* [Search for objects]. Moscow: Soviet Radio, 336 p. (in Russian)
11. **Arbuzov, I.V. and Bolkhovitinov, O.V.** (2008). *Boevye aviatsionnyye komplekсы i ikh effektivnost* [Combat aviation complexes and their effectiveness]. Moscow: VVIA prof. N.E. Zhukovsky, 224 p. (in Russian)
12. **Sebryakov, G.G., Tatarnikov, I.B., Tyuflin, Ju.S., Skryabin, S.V. and Tar-novskiy, A.V.** (2006). *Printsipy sozdaniya universalnykh sistem vizualizatsii kompleksov modelirovaniya dlya zadach obucheniya, situatsionnogo analiza i trenazha* [The principles of creating universal systems for visualization of modeling complexes for learning tasks, situational analysis and training]. *Vestnik kompyuternikh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], no. 3, pp. 48–50. (in Russian)
13. **Sebryakov, G.G., Zheltov, S.Ju. and Tatarnikov, I.B.** (2003). *Kompyuternyye tekhnologii sozdaniya geoprostranstvennykh trekhmernykh stsen, ispolzuyushchikh kompleksirovaniye geograficheskoy informatsii i sintezirovannykh polzovatel'skikh dannykh* [Computer technologies for creation of geo-spatial three-dimensional scenes using the combination of geographic information and synthesized user data]. *Aerospace instrument making*, no. 8, pp. 2–10. (in Russian)
14. **Skopets, G.M.** (2017). *Vneshneye proektirovaniye aviatsionnykh kompleksov: Metodologicheskiye aspekty* [External design of aviation complexes: Methodological aspects]. Moscow: URSS, 344 p. (in Russian)
15. **Aviaciya PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskiy progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnya, zavtra** [Aviation of the Air Defense of Russia and scientific and technical progress: combat complexes and systems yesterday, today, tomorrow]. (2004). Monograph. 2nd ed., stereotype. Ed. E.E. Fedosov. Moscow: Drofa, 816 p. (in Russian)
16. **Abergauz, G.G., Tron, A.P., Kopenkin, Yu.I. and Korovina, I.A.** (1970). *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam* [Handbook of Probabilistic Calculations]. Moscow: Voenizdat, 536 p. (in Russian)
17. **Venttsel, E.S.** (1969). *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 576 p. (in Russian)
18. **Milgramm, Yu.G.** (1974). *Tablitsy i grafiki dlya veroyatnostnykh raschetov. Part 1.* [Tables and graphs for probabilistic calculations. Part 1]. Moscow: VVIA, 381 p. (in Russian)
19. **Korsun, O.N. and Poplavskiy, B.K.** (2007). *Struktura metodologii identifikatsii matematicheskikh modeley samoletov po rezul'tatam letnykh ispytaniy* [The structure of the methodology

for the identification of mathematical models of airplanes based on the results of flight tests]. In the collection: Aviation technologies of the XXI century. IX International Scientific and Technical Symposium ASTEC'07. 2007. (in Russian)

**20. Ovcharenko, V.N.** (2011). *Adaptivnaya identifikatsiya parametrov v dinamicheskikh i staticheskikh sistemakh* [Adaptive identification of parameters in dynamic and static systems]. Automation and Remote Control, no. 3, pp. 113–123. (in Russian)

**21. Korsun, O.N. and Nikolaev, S.V.** (2016). *Identifikatsiya aerodinamicheskikh koeffitsientov samoletov v ekspluatatsionnom diapazone uglov ataki* [Identification of aerodynamic coefficients of aircraft in the operational range of attack angles]. Vestnik kompyuternikh i informatsionnikh tekhnologiy [Herald of Computer and Information Technologies], no. 9, pp. 3–10. (in Russian)

**22. Nikolaev, S.V. and Snegireva, I.V.** (2018). *Programmno-apparatnyy kompleks dlya issledovaniy i otsenivaniya v ispytaniyakh kharakteristik aviatsionnykh kompleksov* [Software and hardware complex for research and evaluation in testing the characteristics of aviation complexes]. Aerospace instrument making, no. 3, pp. 22–36. (in Russian)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey V. Nikolaev**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Research and Test Department 929 of the State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, nikozavr1978@yandex.ru.

**Albert A. Tikhonov**, Test Engineer of the Research and Test Department 929 of the State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, nikozavr1978@yandex.ru.

**Dmitry S. Merentsov**, Test Engineer of the Research and Test Department 929 of the State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, nikozavr1978@yandex.ru.

Поступила в редакцию 10.07.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 10.07.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-94-104

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОБОБЩЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИИ

Р.Н. АКИНШИН<sup>1</sup>, А.В. ПЕТЕШОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Секция прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники, г. Череповец, Россия

Для повышения качества распознавания воздушных объектов предложено использование априорной информации, содержащейся в эталонных портретах, которые формируются адаптивно к условиям наблюдения. Сформулировано решающее правило об отнесении наблюдаемой цели к  $k$ -й группе в предположении, что сигнал и фон являются нормальными стационарными случайными процессами с нулевыми средними значениями и известны ковариационные матрицы портретов. Предложен критерий качества распознавания, итогом выполнения которого является принятие решения с вероятностью не ниже требуемой  $P_r$ . Платой за выполнение этого критерия является изменение содержания решения. Для реализации системы радиолокационного распознавания (РЛР) со структурно-параметрической адаптацией РЛС предложено ввести в данную систему устройство прогноза качества и управления, которое проводит оценку (прогноз) количества информации и изменение решающего правила системы РЛР в соответствии с полученной оценкой. Введен показатель количества информации, извлекаемой системой распознавания из радиолокационного портрета (РЛП), под которым понимается мера снижения неопределенности в процессе принятия решения о группе цели с помощью системы РЛР. Показано, что количество извлекаемой информации зависит не только от параметров РЛП, но и от алгоритма его обработки. Определено потенциальное количество информации о цели  $k$ -й информационной группы, содержащейся в РЛП, введено понятие достаточно информативного портрета при распознавании целей всех групп. Формализованы понятия дифференциальной и интегральной контрастности в случае произвольно коррелированного РЛП. Введенные понятия дифференциальной и интегральной контрастностей для частного случая некоррелированного РЛП распространены на общий случай произвольно коррелированного РЛП.

**Ключевые слова:** радиолокационный портрет, априорная информация, решающее правило.

### ВВЕДЕНИЕ

Качество работы системы распознавания может повышаться в результате изменения содержания (состава) принимаемого системой решения на основе оперативного анализа количества априорной информации, которая может содержаться в радиолокационном портрете (РЛП) при действующих условиях наблюдения, с учетом способностей системы радиолокационного распознавания (РЛР) по извлечению этой информации. При использовании анализа, производимого в реальном времени, принимаемое системой решение может содержать конкретный класс (группу целей в классе) или объединять несколько классов (групп), к которым наиболее вероятно принадлежит наблюдаемая цель.

Априорной информацией, которая может содержаться в портрете, является информация, заключенная в эталонных портретах, сформированных адаптивно к условиям наблюдения – помеховым условиям (отношению сигнал/помеха), а также ориентации цели относительно РЛС, координатам и параметрам движения цели. Так как в системе РЛР осуществляется последовательное сопоставление выходных сигналов каналов обработки между собой, то в первую очередь интерес представляет априорная информация, характеризующая отличия целей одного класса (группы) относительно целей другого класса (группы). Априорная информация о целях конкретного класса (группы) количественно характеризует степень отличия эталонного портрета целей одного класса от эталонного портрета целей другого класса (группы).

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ РЛС

Рассмотрим понятие информационной адаптации структуры решающего правила [1, 2] системы при решении задачи распознавания. Исходя из назначения конкретного радиолокатора, цели многочисленных типов объединяются в функциональные классы, например, «тяжелый реактивный самолет», «легкий реактивный самолет», «легкий винтовой самолет», «тяжелый винтовой самолет», «вертолет», «имитирующая помеха» и другие. Априорной статистикой для системы радиолокационного распознавания являются эталоны групп типов распознаваемых воздушных объектов (ВО), имеющих схожие радиолокационные портреты. Соответственно, каждый функциональный класс разбивается на такие группы, которые назовем информативными группами.

Идеальным результатом распознавания цели является определение информативной группы, к которой принадлежит обнаруженная цель.

Для распознавания ВО по их РЛП может быть использовано большое разнообразие систем [1–5]. Принцип работы этих систем преимущественно основан на формировании и сравнении квадратичных функционалов от поступающего на вход РЛП (координатной информации) в виде матрицы-строки дискретной выборки комплексных амплитуд  $\xi_{g+f} = (\xi_{1(g+f)} \dots \xi_{N(g)})$ , полученных в  $N$  элементах разрешения и представляющих собой аддитивную смесь сигнала, отраженного от цели  $g$ -й группы  $\xi_g = (\xi_{1(g)} \dots \xi_{N(g)})$ ,  $g = \overline{1, M_l}$  и фона  $\xi_f = (\xi_{1(f)} \dots \xi_{N(f)})$ ,  $g = \overline{1, M_f}$ , где  $M_l$  – общее число информативных групп для данного типа и параметров РЛП. Полагаем, что сигнал и фон являются нормальными стационарными случайными процессами с нулевыми средними значениями. Известны ковариационные матрицы портретов  $R_{g+f} = (R_g + R_f)$ , состоящие из ковариационных матриц сигнала  $R_g = \overline{\xi_g^* \xi_g}$ ,  $g = \overline{1, M_l}$  (\* – комплексное сопряжение и транспонирование) и фона  $R_f = \xi_f^* \xi_f$ . Обработка РЛП  $\xi_{g+f}$  осуществляется в  $M_l$  каналах с формированием смещенных квадратичных функционалов

$$z_k = \xi_{g+f} R^{ko} \xi_{g+f}^* + L_k, k = \overline{1, M_l}. \quad (1)$$

Простейшее решающее правило имеет вид: «если  $z_{kl} = (z_k - z_l) \geq 0$  для всех  $l \neq k = \overline{k, M_l}$ , то  $A_k^*$ », где  $A_k$ ,  $A_k^*$  – условие и решение системы о наличии цели  $k$ -й группы, а  $z_{kl}$  является межканальной разностью.

При синтезе адаптивных решающих правил распознавания, основанных на анализе информационных показателей, должны быть использованы критерии качества распознавания. Примером такого критерия может быть следующее требование – «вероятность принятия правильного решения должна быть не ниже требуемой  $P_{tr}$ ». Для выполнения этого критерия в зависимости от помеховой обстановки и условий наблюдения цели, а также вида и алгоритма обработки РЛП в перечень из  $M_l$  типовых решений системы РЛР могут вноситься изменения, зависящие от прогнозируемых вероятностей правильного распознавания целей всех  $M_l$  групп. При этом возможны следующие варианты решения системы РЛР: вариант 1 – ВО принадлежит к одной информативной группе; вариант 2 – ВО принадлежит к совокупности информативных групп, относящихся к одному функциональному классу; вариант 3 – ВО принадлежит к совокупности информативных групп, относящихся к разным функциональным классам.

Итогом выполнения критерия качества является принятие решения с вероятностью правильного решения не ниже требуемой  $P_{tr}$ . Платой за выполнение этого критерия является изменение содержания решения.

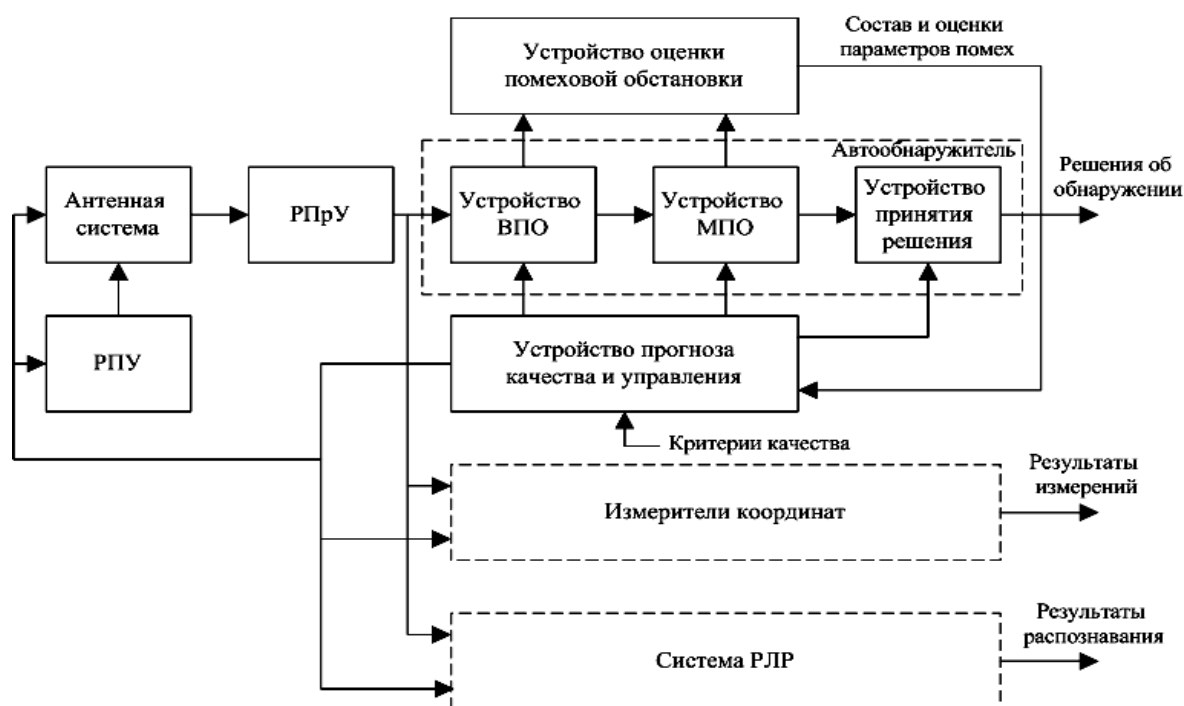
Решение в варианте 3 является наименее приемлемым и фактически представляет собой сигнал управления радиолокатором вида:

- повторное распознавание без изменения вида портрета, выполняемое до момента выполнения критерия;
- повторное распознавание с изменением вида и параметров портрета, формирование которого возможно при других параметрах зондирующего сигнала, и, возможно, параметров обзора радиолокатора.

Последний вариант управления соответствует структурно-параметрической адаптации радиолокатора и предполагает прогноз качества распознавания для всех вариантов формирования РЛП (вариантов зондирующих сигналов), доступных конкретной РЛС. Причем прогноз качества на этапе управления и распознавание выполняются именно для целей тех конкретных классов, по которым было принято конкретное решение в варианте 3.

Для реализации системы РЛР со структурно-параметрической адаптацией РЛС необходимо, как показано на рис. 1, ввести в данную систему устройство прогноза качества и управления. Это устройство (структура представлена на рис. 2 применительно к задаче распознавания) должно обеспечивать:

- оценку (прогноз) количества информации, которая может быть извлечена системой РЛР из РЛП в данных условиях наблюдения при распознавании целей каждой группы;
- изменение решающего правила системы РЛР в соответствии с полученной оценкой количества информации, то есть структурно-параметрическую адаптацию системы РЛР.



**Рис. 1.** Обобщенная схема РЛС со структурно-параметрической адаптацией основных систем и устройств при решении задач обнаружения, измерения координат и распознавания

**Fig. 1.** The generalized scheme of radar station with structural and parametrical adaptation of the main systems and devices in solving the problems of detection, measurement of coordinates and recognition

Важно отметить, что информационные показатели определяются критерием качества, предъявляемого к системе распознавания. Методы повышения качества распознавания, основанные на анализе априорной информации, должны использовать количественно определенные информационные показатели. При радиолокационном распознавании информация о цели извлекается

из отраженного сигнала, а также координат и параметров движения цели. Объем информации определяется потенциальными способностями используемого РЛП и возможностями системы распознавания по извлечению информации (используемыми алгоритмами обработки портрета и адаптации к малоинформативным параметрам). Для наглядности рассмотрим информационные показатели на примере обработки радиолокационного портрета. Эти результаты также легко обобщаются на обработку и анализ информационных показателей координатного портрета.

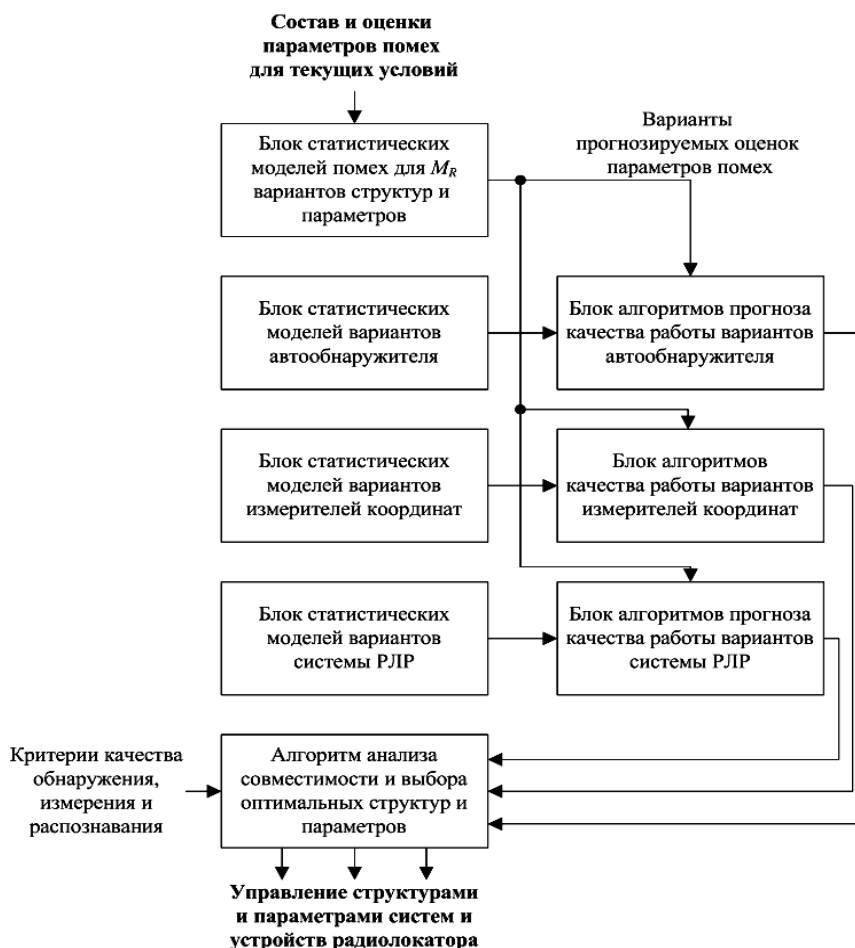


Рис. 2. Структурная схема устройства прогноза качества и управления  
Fig. 2. Block diagram of the device for forecasting quality and control

## КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ, ИЗВЛЕКАЕМОЙ ИЗ ПОРТРЕТА СИСТЕМОЙ РАСПОЗНАВАНИЯ

Для решения задачи синтеза решающего правила со структурно-параметрической адаптацией необходимо ввести показатели количества информации, извлекаемой системой распознавания из РЛП [3, 6]. Предположим, что на вход системы поступает РЛП цели. Принадлежность ее к информационной группе может быть определена двумя путями:

- угадыванием группы, при котором неопределенность в принятии решения наибольшая;
- принятием решения посредством системы РЛР на основании информации, извлекаемой ею из РЛП.

Вероятность правильного угадывания принадлежности цели к  $k$ -й группе определяется выражением  $P_{ug}(A_k^* / A_k) = P_k P_{ug}(A_k^* | A_k)$ , где  $A_k$  – событие, заключающееся в принадлежности

цели к  $k$ -й группе;  $A_k^*$  – событие, заключающееся в принятии решения о принадлежности цели к  $k$ -й группе;  $P_{ug}(A_k^* / A_k)$  – условная вероятность правильного угадывания;  $P_k$  – вероятность появления цели  $k$ -й группы в пространстве распознавания.

Условная вероятность правильного угадывания при отсутствии предпочтительного отношения к какой-либо группе одинакова, то есть равна

$$P_{ug}(A_k^* / A_k) = 1 / M_l, k = \overline{1, M_l}.$$

Вероятность правильного распознавания цели  $k$ -й группы системой определяется [3] как  $P_{sr}(A_k A_k^*) = P_k P_{sr}(A_k^* / A_k)$ , где  $P_{sr}(A_k^* / A_k) = D_k$  – условная вероятность правильного распознавания цели  $k$ -й группы.

В соответствии с [6] под количеством информации, извлекаемой системой из РЛП при решении задачи распознавания, будем понимать меру снижения неопределенности в процессе принятия решения о группе цели с помощью системы РЛР. Тогда количество информации, извлекаемой системой из РЛП при распознавании цели  $k$ -й группы, определяется [7] выражением

$$I_k^{zv} = \log \frac{P_{sr}(A_k A_k^*)}{P_{ug}(A_k A_k^*)} = \log \frac{D_k}{P_{ug}(A_k^* / A_k)} = \log D_k + \log M_l. \quad (2)$$

Соответственно, общее количество информации, извлекаемой системой из РЛП при распознавании целей всех  $M_l$  групп, определяется как

$$I_{\Sigma}^{zv} = \sum_{k=1}^M I_k^{zv} = \sum_{k=1}^M \log D_k + M_l \log M_l = \log \prod_{k=1}^{M_l} D_k + M_l \log M_l. \quad (3)$$

Количество извлекаемой информации зависит не только от параметров РЛП, но и от алгоритма его обработки [8, 9]. Поэтому под потенциальным количеством информации о цели  $k$ -й информационной группы, содержащейся в РЛП, будем понимать меру снятой неопределенности в процессе принятия решения о принадлежности цели к  $k$ -й группе с использованием системы РЛР, реализующей байесовский критерий. Потенциальное количество информации определяется как  $I_k^{pot} = (\log D_k^{opt} + \log M_l)$ , где  $D_k^{opt}$  – условная вероятность правильного распознавания цели  $k$ -й группы системой с байесовским критерием распознавания. Объем информации, содержащейся в РЛП, определяется объемом знаний о РЛП и возможностью их учета в эталонах [10].

Соответственно, общее, потенциально извлекаемое из РЛП количество информации о целях всех  $M$  групп, определяется выражением

$$I_{\Sigma}^{pot} = \sum_{k=1}^{M_l} I_k^{pot} = \sum_{k=1}^{M_l} \log D_k^{pot} + M_l \log M_l = \log \prod_{k=1}^{M_l} D_k^{pot} + M_l \log M_l.$$

Условная вероятность правильного распознавания цели  $k$ -й группы  $M_l$ -канальной системой РЛР в предположении о некоррелированности выходных сигналов каналов обработки определяется выражением

$$D_k = \prod_{l \neq k=1}^{M_l} D_{kl}, \quad (4)$$

где  $D_{kl}$  – условная вероятность того, что выходной сигнал  $z_k$   $k$ -го канала обработки, согласованного с РЛП цели  $k$ -й группы, больше либо равен сигналу  $z_l$ ,  $l$ -го канала обработки при наличии портрета цели  $k$ -й группы.

С учетом (4), выражения (2) и (3) преобразуются к виду

$$I_k^{zv} = \sum_{l \neq k=1}^{M_l} \log D_{kl} + \log M_l,$$

$$I_{\Sigma}^{zv} = \sum_{k=1}^{M_l} \sum_{l \neq k=1}^{M_l} \log D_{kl} + M_l \log M_l.$$

Портрет полагается достаточно информативным для системы при распознавании цели  $k$ -й группы относительно целей остальных  $(M_l - 1)$  групп, если  $I_k^{zv} \geq I_{dos}$ , или недостаточно информативным, если  $I_k^{zv} < I_{dos}$ , где  $I_{dos}$  – достаточное количество информации, извлекаемой системой из РЛП, для принятия решения  $A_k^*$  при условии  $A_k$  с вероятностью  $D_k = P_{lr}$ , то есть  $I_{dos} = (\log P_{lr} + \log M_l)$ . Соответственно портрет называется достаточно информативным для системы РЛП при распознавании целей всех  $M_l$  групп, если

$$I_k^{zv} \geq I_{dos}, k = \overline{1, M}.$$

### ИНФОРМАТИВНОСТЬ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ КОНТРАСТНОСТЬ В СЛУЧАЕ ПРОИЗВОЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННОГО РЛП

Условие достаточной информативности РЛП можно записать в виде неравенства  $\sum_{l \neq k=1}^{M_l} \log D_{kl} \geq \log P_{lr}, k = \overline{1, M_1}$ , достаточным условием выполнения которого является

$$\log D_{kl} \geq (M_1 - 1)^{-1} \log P_{lr}, k = \overline{1, M_1}, l \neq k = \overline{1, M_1} \text{ или } D_{kl} \geq {}^{M_1-1}\sqrt{P_{lr}}, k = \overline{1, M_1}, l \neq k = \overline{1, M_1}. \quad (5)$$

В общем случае вероятность  $D_{kl}$  определяется выражением

$$D_{kl} = \int_0^{\infty} P_k(z_{kl}) dz_{kl}, \quad (6)$$

где  $\rho_k(z_{kl})$  – условная плотность вероятности межканальной разности  $z_{kl}$  при наличии на входе системы РЛП портрета цели  $k$ -й группы<sup>1</sup>.

При достаточно большом числе элементов произвольно коррелированного РЛП плотность  $\rho_k(z_{kl})$  можно аппроксимировать нормальным законом

$$P_k(z_{kl}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda_l^{k/k}}} \exp \left\{ -\frac{(z_{kl} - \overline{z_{kl/k}})^2}{2\lambda_l^{k/k}} \right\},$$

<sup>1</sup> Special: Striving to Protect America, Technology Innovation [Электронный ресурс] // NASA's magazine for business and technology. 2004. Vol. 11, № 4. Режим доступа: <http://nctn.hq.nasa.gov> (дата обращения 08.06.2018).

где  $\lambda_l^{k/k}$  – собственные значения ковариационной матрицы  $M_{k/k}$  межканальных разностей при наличии цели  $k$ -й группы;  $\overline{z_{kl/k}}$  – среднее значение случайной величины  $z_{kl}$  при наличии цели  $k$ -й группы [12].

Если межканальные разности  $z_{kl}, l \neq k = \overline{1, M_1}$  некоррелированы, то  $z_{kl/k} = L_{kl} + tr X^{kl/k}$ ,  $\lambda_l^{k/k} = \sigma_{kl/k}^2 = tr(X^{kl/k})^2$ , где  $L_{kl} = (a_k - a_l)$  – межканальное смещение;  $tr X^{kl/k}$ ,  $tr(X^{kl/k})^2$  – след определяющей матрицы и след определяющей матрицы, возведенной во вторую степень. Причем

$$L_{kl} = \ln \frac{\det R_{l+]} }{\det R_{k+]} } + 2 \ln \frac{c_k}{c_l}, \quad X^{kl/k} = (R_{k+]} Q_{l+]} - E),$$

где  $c_k, c_l$  – коэффициенты байесовского риска [3, 4], полагаемые для простоты равными ( $c_k = c_l$ );  $E$  – единичная матрица.

С учетом этих ограничений выражение (6) преобразуется к виду

$$D_{kl} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi \left( \frac{\overline{z_{kl/k}}}{\sqrt{\lambda_l^{k/k}}} \right), \quad (7)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt$  – интеграл вероятности.

Соответственно, условие достаточной информативности РЛП (5) можно записать в виде [3]

$$\frac{\overline{z_{kl/k}}}{\sqrt{\lambda_l^{k/k}}} \geq \arg \Phi(2^{M_l-1} \sqrt{P_{tr}} - 1), k = \overline{1, M_1}, l \neq k = \overline{1, M_1} \text{ или } G_{kl/k} \geq G_0, k = \overline{1, M_1}, l \neq k = \overline{1, M_1}, \quad (8)$$

где  $\arg \Phi(y)$  – аргумент интеграла вероятности  $\Phi(x) = y$ ;  $G_{kl/k} = \frac{\overline{z_{kl/k}}}{\sqrt{\lambda_l^{k/k}}}$  – информативность

РЛП цели  $k$ -й группы относительно РЛП цели  $l$ -й группы;

$G_0 = \arg \Phi(2^{M_l-1} \sqrt{P_{tr}} - 1)$  – достаточная информативность РЛП для распознавания цели любой группы.

Распространим введенные в [3] понятия дифференциальной и интегральной контрастностей для частного случая некоррелированного РЛП на общий случай произвольно коррелированного РЛП [4]. Учтем, что определяющая матрица для цели  $k$ -й группы  $X^{kl/k} = (R_{k+]} Q_{l+]} - E)$ , а ее собственные значения определяются выражением

$$\mu_n^{kl/k} = (\mu_n^{kl} - 1), n = \overline{1, N},$$

где  $\mu_n^{kl}, n = \overline{1, N}$  – собственные значения произведения матриц  $(R_{k+]} Q_{l+]} )$ .

Под *дифференциальной контрастностью*  $\Delta_n^{kl}$   $n$ -го элемента РЛП цели  $k$ -й группы относительно  $n$ -го элемента РЛП цели  $l$ -й группы с учетом помехового фона будем понимать [4]  $n$ -е собственное значение определяющей матрицы  $X^{kl/k} = (R_{k+f} Q_{l+f} - E)$ , то есть

$$\Delta_n^{kl} = \mu_n^{kl/k} = (\mu_n^{kl} - 1). \quad (9)$$

При условии  $c_k = c_l$  выражения для смещения  $a_{kl}$  и среднего значения  $\overline{z_{kl/l}}$  межканальной разности имеют вид

$$L_{kl} = -\ln \frac{\det R_{k+f}}{\det R_{l+f}} = -\sum_{n=1}^N \ln \mu_n^{kl} = -\sum_{n=1}^N \ln(1 + \mu_n^{kl/k}),$$

$$\overline{z_{kl}} = L_{kl} + \sum_{n=1}^N \ln \mu_n^{kl/k} = \sum_{n=1}^N [\mu_n^{kl/k} - \ln(1 + \mu_n^{kl/k})].$$

Если собственные значения определяющей матрицы удовлетворяют неравенству  $(-1 < \mu_n^{kl/k} \leq 1)$ , то логарифм  $\ln(1 + \mu_n^{kl/k})$  можно разложить в степенной ряд и, ограничившись двумя его членами, получить

$$\ln(1 + \mu_n^{kl/k}) \cong \left[ \mu_n^{kl/k} - \frac{1}{2} (\mu_n^{kl/k})^2 \right].$$

С учетом этого в случае независимости межканальных разностей выражение для информативности РЛП цели  $k$ -й группы на фоне РЛП цели  $l$ -й группы приводится к приближенному упрощенному виду

$$G_{kl/k} \cong \frac{1}{2} g_{kl/k},$$

где  $g_{kl/k} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\mu_n^{kl/k})^2} = \sqrt{\text{tr}(X^{kl/k})^2}$  – интегральная контрастность РЛП цели  $k$ -й группы по отношению к РЛП цели  $l$ -й группы.

Таким образом, предложено для повышения качества распознавания воздушных объектов использование априорной информации, содержащейся в эталонных портретах, формируемых адаптивно к условиям наблюдения. Введены понятия дифференциальной и интегральной контрастности в случае произвольно коррелированного РЛП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ширман Я.Д.** Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко // Радиолокация и радиометрия. 2000. № 2. С. 5–65.
2. **Васильев О.В.** Особенности распознавания воздушных целей в бортовой РЛС при длительной когерентной обработке сигналов / В.А. Абатуров, Р.А. Потапов, А.Г. Ситников, С.С. Коротков // Радиотехника. 2011. № 2. С. 43–51.
3. **Абатуров В.А.** Математические модели радиолокационных сигналов, отраженных от воздушных целей разных классов / О.В. Васильев, В.А. Ефимов, В.Е. Макаев // Радиотехника. 2006. № 7. С. 28–33.

4. Цивлин И.П. Автоматическое распознавание радиолокационных изображений в бортовой РЛС // Радиотехника. 2002. № 9. С. 43–50.
5. Jacobs S.P., O'Sullivan J.A. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range-profiles // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2000. Vol. 36, № 2. Pp. 364–382.
6. Фомин Я.А., Тарловский Г.Р. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
7. Акиншин Н.С. Радиосистемы передачи информации / В.Ф. Авилушкин, В.Д. Дудка, В.А. Николаев. Тула: ТАИИ, 2003. С. 475–480.
8. Затучный Д.А. Уменьшение погрешностей при передаче данных с борта воздушного судна в горных районах для ОБЧ-диапазона путем совершенствования выбора места передачи // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 176. С. 150–152.
9. Брайткрайц С.Г. Методический подход к определению места нетрадиционных методов радиолокации в перспективном радиолокационном применении / Е.М. Ильин, А.И. Полубехин, Д.А. Затучный // Вестник СПбГУ ГА. 2017. № 3(16). С. 72–84.
10. Козлов А.И. Поляризационно-доплеровская функция отклика составного радиолокационного объекта в задаче обнаружения / В.Н. Татаринов, С.В. Татаринов, Н.Н. Кривин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 193(7). С. 26–28.
11. Козлов А.И. «Поляризационный след» при рассеянии электромагнитных волн составными объектами / В.Н. Татаринов, С.В. Татаринов, Н.Н. Кривин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 189(3). С. 66–73.
12. Троицкий В.И. Разработка методов математического моделирования радиотепловых КЭСН летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 5. С. 97–103.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Акиншин Руслан Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Секции прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, [rakinshin@yandex.ru](mailto:rakinshin@yandex.ru).

**Петешов Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры ЧВВИУРЭ, [D-john\\_post@mail.ru](mailto:D-john_post@mail.ru).

## INFORMATION INDICATORS OF RADAR PORTRAITS OF AIR OBJECTS AND GENERALIZED INDICATORS OF THE ABILITY OF RECOGNITION SYSTEMS TO EXTRACT INFORMATION

**Ruslan N. Akinshin<sup>1</sup>, Andrey V. Peteshov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Section of Applied Problems at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics, Cherepovets, Russia*

## ABSTRACT

To improve the quality of recognition of air objects, it is proposed to use a priori information contained in reference portraits, which are formed adaptively to the conditions of observation. A decisive rule is formulated on the assignment of the observed target to the k-th group under the assumption that the signal and background are normal stationary random processes with zero mean values and the covariance matrices of portraits are known. The quality criterion of recognition is proposed, the result of which implementation is a decision with a probability not below the required  $P_{tr}$ . The price for the implementation of this criterion is the decision content change. For the implementation of the radar recognition system (HRD) with structural-parametric adaptation of the radar it is

proposed to introduce into the system a device of the quality and control forecast, which conducts the assessment (forecast) of the amount of information and change the decisive rule of the HRD system in accordance with the received assessment. An indicator of the amount of information extracted by the recognition system from the radar portrait (RLP) is introduced, which is thought as a measure of reducing uncertainty in the decision-making process on the target group with the help of the RLR system. It is shown that the amount of extracted information depends not only on the parameters of the RLP, but also on the algorithm of its processing. The potential amount of information about the goal of the  $k$ -th information group contained in the RLP is determined, the concept of a sufficiently informative portrait with the recognition of the goals of all groups is introduced. The concepts of differential and integral contrast are formalized in the case of arbitrarily correlated RLP. The introduced concepts of differential and integral contrasts for the special case of uncorrelated RLP are extended to the General case of arbitrarily correlated RLP.

**Key words:** radar portrait, a priori information, decisive rule.

## REFERENCES

1. Shirman, Y.D., Gorshkov, C.A., Leshenko, S.P. Bratchenko, G.D. and Orlenko, V.M. (2000). *Metody radiolokatsionnogo raspoznavaniya i ikh modelirovanie* [Methods of radar recognition and modeling]. *Radiolokatsiya i radiometriya* [Radar and radiometry], no. 2, pp. 5–65. (in Russian)
2. Vasiliev, O.V., Abaturov, V.A., Potapov, R.A., Sitnikov, A.G. and Korotkov, S.S. (2011). *Osobennosti raspoznavaniya vozdukhnykh tseley v bortovoy RLS pri dlitelnoy kogerentnoy obrabotke signalov* [The features of identification of air targets in radar with long-term coherent signal processing]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 2, pp. 43–51. (in Russian)
3. Abaturov, V.A., Vasiliev, O.V., Efimov, V.A. and Makaev, V.E. (2006). *Matematicheskie modeli radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot vozdukhnykh tseley raznykh klassov* [Mathematical models of radar signals reflected from air targets of different classes]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 7, pp. 28–33. (in Russian)
4. Tsivilin, I.P. (2002). *Avtomaticheskoe raspoznavanie radiolokatsionnykh izobrazheniy v bortovoy RLS* [Automatic recognition of radar images in the onboard RLS]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], no. 9, pp. 43–50. (in Russian)
5. Jacobs, S.P. and O'Sullivan, J.A. (2000). *Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range-profiles*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 36, no. 2, pp. 364–382.
6. Fomin, Y.A. and Tarlovskiy, G.R. (1986). *Statisticheskaya teoriya raspoznavaniya obrazov* [Statistical theory of pattern recognition]. Moscow: Radio i svyaz, 264 p. (in Russian)
7. Akinshin, N., Avilushkin, V.F., Dudka, V.D. and Nikolaev, V.A. (2003). *Radiosistemy peredachi informatsii* [Radio systems of information transfer]. Tula: TAI, pp. 475–480. (in Russian)
8. Zatuchniy, D.A. (2012). *Umenshenie pogreshnostey pri peredache dannykh s borta vozduhnogo sudna v gornykh rayonakh dlya ovch-diapazona putem sovershenstvovaniya vybora mesta peredachi* [Reducing errors in the transmission of data from aircraft in mountain areas for the VHF band by improving the choice of the transmission place]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 176, pp. 150–152. (in Russian)
9. Braytkrayc, S.G., Ilin, E.M., Polubekhin, A.I. and Zatuchniy, D.A. (2017). *Metodicheskij podkhod k opredeleniyu mesta netraditsionnykh metodov radiolokatsii v perspektivnom radiolokatsionnom primenenii* [A methodical approach to determining the location of non-traditional methods of radar in a prospective radar application]. *Vestnik SPbGU GA* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation], vol. 3, no. 16, pp. 72–84. (in Russian)
10. Kozlov, A.I., Tatarinov, V.N., Tatarinov, S.V. and Krivin, N.N. (2013). *Polyarizacionno-dopplerovskaya funktsiya otklika sostavnogo radiolokatsionnogo obekta v zadache obnaruzheniya* [Polarization-Doppler response function of a composite radar object in the detection problem]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, vol. 7, no. 193, pp. 26–28. (in Russian)

11. Kozlov, A.I., Tatarinov, V.N., Tatarinov, S.V. and Krivin, N.N. (2013). «*Polyarizatsionnyy sled*» pri rasseyanii elektromagnitnykh voln sostavnymi obektami [“Polarization trace” in the scattering of electromagnetic waves by composite objects]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, vol. 3, no. 189, pp. 66–73. (in Russian)

12. Troickiy, V.I. (2016). *Razrabotka metodov matematicheskogo modelirovaniya radio-  
teplovykh KESN letatelnykh apparatov* [Development of methods for mathematical modeling of radio  
thermal CERN aircraft]. Civil Aviation High Technologies, vol. 19, no. 5, pp. 97–103. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ruslan N. Akinshin**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Section of Applied Problems at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, [rakinshin@yandex.ru](mailto:rakinshin@yandex.ru).

**Andrey V. Peteshov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the CWIURE Chair, [D-john\\_post@mail.ru](mailto:D-john_post@mail.ru).

Поступила в редакцию 11.05.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 11.05.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-105-116

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ, ПАРАЗИТИРУЮЩЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Е.Г. БОРИСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия*

В настоящее время в районах крупных городов наблюдается устойчивая тенденция к увеличению пространственной плотности телекоммуникационных систем. Насыщенность радиоспектра аналоговыми и цифровыми системами, используемыми для решения задач радиосвязи и телевидения, позволяет на их основе совершенствовать технологии полуактивного радиолокационного обнаружения и определения координат воздушных объектов (ВО). Осуществление радиолокационного наблюдения с использованием передатчиков нерадиолокационного назначения часто называют полуактивной радиолокацией с использованием сторонних или «паразитных» источников излучения. Преимуществами систем являются минимизация затрат на развертывание, незначительные эксплуатационные энергозатраты, низкая вероятность постановки помех, скрытность факта работы, экологичность и отсутствие требований к выделению радиочастотного ресурса. Относительно большие высоты поднятия антенн связных и телевизионных передатчиков при существующей излученной мощности создают благоприятные условия для обнаружения маловысотных ВО. Цифровые сигналы современных телекоммуникационных систем имеют ширину спектра, обеспечивающую приемлемое разрешение и точность измерения суммарной дальности и угловых координат. В общем случае системы такого типа представляют собой полистатическую (многопозиционную) систему, состоящую из одного или нескольких источников излучения и одной или нескольких приемных позиций, разнесенных в пространстве. Перспективной задачей, решаемой такими системами наряду с контролем воздушного пространства, является управление воздушным движением (УВД). В работе рассмотрены варианты определения прямоугольных координат ВО в системе бистатических радиолокационных станций, использующих для обнаружения целей радиоизлучение сторонних источников. Рассмотрены варианты местоопределения воздушных объектов при различном составе первичных измерений координат и количестве передающих позиций. Приведены аналитические выражения для расчета проекций вектора скорости цели на оси декартовой системы координат. Произведена оценка точности определения местоположения воздушных объектов для многопозиционных радиосистем такого типа.

**Ключевые слова:** бистатическая локация, метод наименьших квадратов, суммарно-дальномерные, угломерные измерения, определение местоположения, точность, полуактивная радиолокация.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развернуты широкие исследования по использованию коммерческих передатчиков FM и DAB – радио, цифрового телевидения (форматов DVB-T, DVB-T2) и сигналов базовых станций сотовой связи для обнаружения воздушных объектов (ВО) [1–12]. В настоящее время такими фирмами, как Thales (Франция), Lockheed Martin (США), ERA (Чешская Республика), Leonardo (Италия)<sup>1</sup> и др., проводятся интенсивные исследования по разработке и проектированию радиолокационных комплексов, одновременно использующих несколько сторонних передатчиков различных диапазонов. По мнению разработчиков, создание маловысотного радиолокационного поля, дополняющего штатные средства радиолокационного наблюдения, существенно повысит достоверность и надежность радиолокационного наблюдения ВО в интересах УВД [8, 9]. В работе [3] описана экспериментальная бистатическая радиолокацион-

<sup>1</sup> Passive Coherent Locator History and Fundamentals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sto.nato.int/publications/.../EN-SET-243-01.pdf> (дата обращения: 20.04.2018).

ная система, которая обнаруживает и отслеживает цели на дальностях более 150 км от приемника, используя эхо-сигналы радиопередатчика FM. В [11] обосновано использование телевизионного передатчика в бистатической радиолокационной системе, позволяющей обнаруживать ВО в диапазоне до 260 км, оценивать их декартовы координаты с использованием расширенного фильтра Калмана. В [12] приведены результаты исследований и экспериментальные данные по применению радиосистем стандарта беспроводной передачи данных LTE для обнаружения движущихся объектов. Стоит отметить, что перечисленные работы, по сути, являются развитием исследований, проведенных в [13–15], но с учетом специфики развития радиолокационной техники и требований, предъявляемых к радиотехническим системам. Важной задачей обработки радиолокационной информации в системах подобного типа является оптимизация процедуры оценки прямоугольных координат ВО и скорости их изменения.

В работе [16] рассмотрен вариант определения координат объекта при использовании пространственно-временного сигнала, что позволяет оценивать на приемной позиции угол, под которым облучается ВО. Это позволяет повысить в ряде случаев точность оценивания координат объектов. В [17] показан выигрыш в точности оценивания координат за счет совместной обработки результатов измерений в разностно-дальномерно-угломерной системе пассивной локации. В статьях [18, 19] показана применимость алгоритмов, основанных на замкнутом виде решения нелинейных уравнений, для оценки местоположения объектов.

Целью статьи является анализ способов определения координат и параметров движения воздушных объектов бистатическими локационными системами при различном составе первичных измерений и количестве передающих позиций.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим варианты определения координат и параметров движения целей в зависимости от состава измеряемых координат, количества сторонних передатчиков. На рис. 1 приведена геометрия расположения  $N$  передающих и приемной позиции при локации ВО.

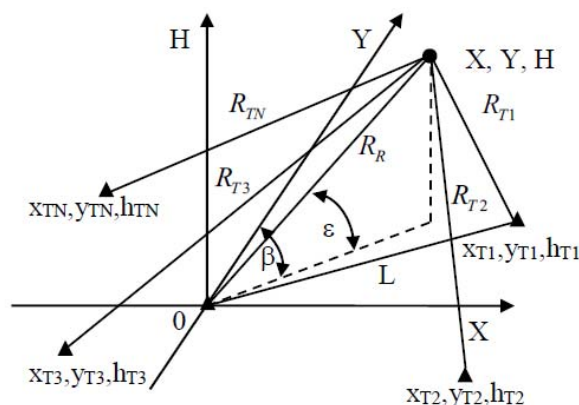


Рис. 1. Геометрия бистатической радиолокационной системы  
Fig. 1. Geometry of the bistatic radar system

Параметрами, подлежащими первичному измерению в бистатической системе, являются

$$R_{\Sigma i} = R_R + R_{Ti} = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2} + \sqrt{(X - x_{Ti})^2 + (Y - y_{Ti})^2 + (H - h_{Ti})^2}, \quad (1)$$

$$\beta = a \tan \frac{X}{Y} + \frac{\pi}{2} (2 - \text{sign} X - \text{sign} X \text{sign} Y), \quad \varepsilon = a \tan \frac{H}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad (2)$$

где  $R_{\Sigma i}$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  – суммарная дальность, азимут и угол места ВО соответственно;  $R_R$  – дальность до цели относительно приемной позиции;  $R_{Ti}$  – дальности передающая позиция – цель,  $\text{sign}$  – математическая функция, определяющая знак числа, причем  $\text{sign} X = 1$  при  $X \geq 0$  и  $\text{sign} X = -1$  при  $X < 0$ ,  $x_{Ti}, y_{Ti}, h_{Ti}$  – координаты расположения позиций передающих систем [20].

Представим (1) как  $R_{\Sigma i}^2 - 2R_{\Sigma i}R_R = L_{Ti}^2 - 2Xx_{Ti} - 2Yy_{Ti} - 2Hh_{Ti}$  и, учитывая, что  $X = R_R \cos(\varepsilon) \sin(\beta)$ ,  $Y = R_R \cos(\varepsilon) \cos(\beta)$ ,  $H = R_R \sin(\varepsilon)$ ,  $L_{Ti} = \sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + h_{Ti}^2}$ , получим выражение  $R_{\Sigma i}^2 - L_{Ti}^2 = 2R_R(R_{\Sigma i} - x_{Ti} \cos(\varepsilon) \sin(\beta) - y_{Ti} \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - h_{Ti} \sin(\varepsilon))$ , из которого выразим дальность до ВО и его прямоугольные координаты:

$$R_R = \frac{R_{\Sigma}^2 - L_T^2}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon) \sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (3)$$

$$X = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2) \cos(\varepsilon) \sin(\beta)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon) \sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (4)$$

$$Y = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2) \cos(\varepsilon) \cos(\beta)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon) \sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}, \quad (5)$$

$$H = \frac{(R_{\Sigma}^2 - L_T^2) \sin(\varepsilon)}{2(R_{\Sigma} - x_T \cos(\varepsilon) \sin(\beta) - y_T \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - h_T \sin(\varepsilon))}. \quad (6)$$

Формулы (3)–(6) подразумевают применение суммарно-дальномерно-угломерной системы при одной передающей позиции.

При наличии  $N$  передатчиков из (1)–(2) получим формулу  $(R_{\Sigma i}^2 - L_{Ti}^2) \cos(\varepsilon) \cos(\beta) = 2Y(R_{\Sigma i} - y_{Ti} \cos(\varepsilon) \cos(\beta)) - 2Xx_{Ti} \cos(\varepsilon) \cos(\beta) - 2Hh_{Ti} \cos(\varepsilon) \cos(\beta)$ , на основании которой запишем матрицы искоемых  $A_{R\beta}$  и измеряемых параметров  $S_{R\beta}$

$$A_{R\beta} = \begin{bmatrix} x_{T1}\alpha & y_{T1}\alpha - R_{\Sigma 1} & h_{T1}\alpha \\ x_{T2}\alpha & y_{T2}\alpha - R_{\Sigma 2} & h_{T2}\alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN}\alpha & y_{TN}\alpha - R_{\Sigma N} & h_{TN}\alpha \end{bmatrix}, \quad S_{R\beta} = 0,5\alpha \begin{bmatrix} (L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2) \\ (L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2) \\ \vdots \\ (L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\alpha = \cos(\varepsilon) \cos(\beta)$ .

С учетом (7) искомый вектор координат  $Z_R = [X, Y, H]^T$  определим, используя метод наименьших квадратов (МНК) [17]:

$$Z_R = (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} A_{R\beta}^T S_{R\beta}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) подразумевают применение суммарно-дальномерно-угломерной системы при N передающих позициях.

В случае, когда на приемной позиции не производится измерения угловых координат, но возможно измерение N сумм расстояний, представим (1) в виде следующей формы записи:

$R_{\Sigma i} = R_R + \sqrt{(X - x_{Ti})^2 + (Y - y_{Ti})^2 + (H - h_{Ti})^2}$ . Полученное выражение преобразуем к виду  $R_{\Sigma i}^2 - 2R_{\Sigma i}R_R + 2Xx_{Ti} + 2Yy_{Ti} + 2Hh_{Ti} - L_{Ti}^2 = 0$ , что позволит представить соответствующие матрицы как

$$A_R = \begin{bmatrix} x_{T1} & y_{T1} & h_{T1} & -R_{\Sigma 1} \\ x_{T2} & y_{T2} & h_{T2} & -R_{\Sigma 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN} & y_{TN} & h_{TN} & -R_{\Sigma N} \end{bmatrix}, \quad S_R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2 \\ L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2 \\ \vdots \\ L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

и определить прямоугольные координаты ВО по аналогии с (8). Отметим, что в этом случае в состав  $Z_R$  входит дальность относительно приемной позиции  $R_R$ .

Рассмотрим вариант минимизации количества передающих позиций для определения искомых координат, учитывая, что дальность между воздушным объектом и целью равна  $R_R = \|x\| = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$ , запишем (1) как

$$Xx_{Ti} + Yy_{Ti} + Hh_{Ti} = R_R R_{\Sigma i} + 0,5(L_{Ti}^2 - R_{\Sigma i}^2). \quad (10)$$

На основании (10) получим уравнение

$$Z_T Z_R = S_R + S_{R\Sigma} R_R, \quad (11)$$

где

$$Z_T = \begin{bmatrix} x_{T1} & y_{T1} & h_{T1} \\ x_{T2} & y_{T2} & h_{T2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN} & y_{TN} & h_{TN} \end{bmatrix} \quad (12)$$

матрица местоположений позиций передающих систем,

$$S_{R\Sigma} = \begin{bmatrix} R_{\Sigma 1} \\ R_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ R_{\Sigma N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

матрица измеренных суммарных дальностей.

Левая часть (11) соответствует стандартной форме линейного уравнения, однако правая часть содержит неизвестный параметр  $R_R = \|x\|$ . Необходимо получить решение, игнорирующее дальность  $R_R = \|x\|$  в правой части (11), считая ее постоянной. Получим предварительное решение в виде

$$Z_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T (S_R + S_{R\Sigma} R_R). \quad (14)$$

Для определения неизвестного значения  $R_R$  в (14) введем дополнительные обозначения

$$U_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T S_R, \quad B_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T S_{R\Sigma}, \quad (15)$$

тогда

$$Z_R = U_R + B_R \|x\|. \quad (16)$$

Представив  $\|x\| = x^T x$  и возведя в квадрат (16), получаем уравнение относительно  $\|x\| = R_R$  в следующей форме записи:  $(B_R^T B_R - 1)R_R^2 - 2U_R^T U_R R_R + U_R^T U_R = 0$ , решением которого является искомая дальность

$$R_R = \|x\| = \frac{-2U_R^T B_R \pm \sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}}{(B_R^T B_R - 1)}. \quad (17)$$

Формулы (9), (14) и (17) подразумевают применение алгоритма суммарно-дальномерной системы локации при N передающих позициях. Полученные формулы позволяют определить прямоугольные координаты ВО при количестве передающих позиций  $N = 3$ .

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрим варианты определения проекций вектора скорости ВО на оси прямоугольной системы координат  $\dot{Z}_R = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{H}]^T$ , что позволит определить его вектор скорости  $V = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2}$ . Применив к (8) правила дифференцирования матриц, получим

$$\dot{Z}_R = 0,5 \left[ (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} (\dot{A}_{R\beta}^T S_{R\beta} + A_{R\beta}^T \dot{S}_{R\beta}) - (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} (\dot{A}_{R\beta}^T A_{R\beta} + A_{R\beta}^T \dot{A}_{R\beta}) (A_{R\beta}^T A_{R\beta})^{-1} A_{R\beta}^T S_{R\beta} \right], \quad (18)$$

где

$$\dot{A}_{R\beta} = (-1) \begin{pmatrix} x_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{T1}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ x_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{T2}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & \dot{R}_{\Sigma 1} + y_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) & h_{TN}(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \end{pmatrix}, \quad \dot{S}_{R\beta} = (-0,5) \begin{pmatrix} 2R_{\Sigma 1} \dot{R}_{\Sigma 1} \alpha + (L_{T1}^2 - R_{\Sigma 1}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ 2R_{\Sigma 2} \dot{R}_{\Sigma 2} \alpha + (L_{T2}^2 - R_{\Sigma 2}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \\ \vdots \\ 2R_{\Sigma N} \dot{R}_{\Sigma N} \alpha + (L_{TN}^2 - R_{\Sigma N}^2)(\dot{\alpha}_\varepsilon + \dot{\alpha}_\beta) \end{pmatrix}_{N \times 1},$$

результат дифференцирования (7) по времени, а  $\dot{\alpha}_\varepsilon = \dot{\varepsilon} \sin(\varepsilon) \cos(\beta)$ ,  $\dot{\alpha}_\beta = \dot{\beta} \cos(\varepsilon) \sin(\beta)$ .

Выражения (18) подразумевают оценивание проекций вектора скорости цели в суммарно-дальномерно-угломерной системе. При применении (18) необходимо дополнительно оценивать угловые скорости изменения  $\dot{\beta}$  и  $\dot{\varepsilon}$  способами, рассмотренными, например, в [21]. При отсутствии измерений угловых координат результат дифференцирования (9) по времени запишем в виде

$$\dot{A}_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma 1} \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma 2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{R}_{\Sigma N} \end{bmatrix}, \quad \dot{S}_R = (-1) \begin{bmatrix} R_{\Sigma 1} \dot{R}_{\Sigma 1} \\ R_{\Sigma 2} \dot{R}_{\Sigma 2} \\ \vdots \\ R_{\Sigma N} \dot{R}_{\Sigma N} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Применение (19) по аналогии с (18) позволяет получить искомые проекции вектора скорости цели на оси прямоугольной системы координат и радиальную скорость цели  $\dot{R}_R$  относительно приемной позиции при наличии измерений суммарной дальности и скорости ее изменения.

Дифференцирование по времени (13)–(17) позволяет получить следующие формулы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_R &= (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T \dot{S}_R, \quad \dot{B}_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T \dot{S}_{R\Sigma}, \\ \dot{R}_R &= -2 \frac{(\dot{U}_R^T B_R + \dot{U}_R^T \dot{B}_R)(B_R^T B_R - 1) - U_R^T B_R (\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)}{2(B_R^T B_R - 1)^2} \pm \\ &\pm \frac{8(U_R^T B_R)(\dot{U}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R) - 4((\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)U_R^T U_R) + (B_R^T B_R - 1)(\dot{U}_R^T U_R + U_R^T \dot{U}_R)}{4(B_R^T B_R - 1)\sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}} \pm \\ &\pm \frac{(\dot{B}_R^T B_R + B_R^T \dot{B}_R)\sqrt{4(U_R^T B_R)^2 - 4(B_R^T B_R - 1)U_R^T U_R}}{2(B_R^T B_R - 1)^2}, \end{aligned}$$

где  $\dot{S}_{R\Sigma} = \|\dot{R}_{\Sigma 1}, \dot{R}_{\Sigma 2} \dots \dot{R}_{\Sigma N}\|^T$ .

Суммарная доплеровская частота  $F_{\Sigma i}$  связана с  $\dot{R}_{\Sigma i}$  известным соотношением  $F_{\Sigma i} = \dot{R}_{\Sigma i} / \lambda_i$ , где  $\lambda_i$  – длина волны передатчика, и может быть определена известными способами [3, 10, 13–15]. Беря производную по времени от (14), получим зависимость для определения проекций вектора скорости цели на оси прямоугольной системы координат

$$\dot{Z}_R = (Z_T^T Z_T)^{-1} Z_T (\dot{S}_R + \dot{S}_{R\Sigma} R_R + S_{R\Sigma} \dot{R}_R). \quad (20)$$

Формула (20) предполагает вычислительные процедуры суммарно-дальномерной системы при трех и более передающих позициях.

Продифференцировав (1), получим формулу для скорости изменения суммарной дальности

$$\dot{R}_{\Sigma i} = \frac{X\dot{X} + Y\dot{Y} + H\dot{H}}{R_R} + \frac{(X - x_{Ti})\dot{X} + (Y - y_{Ti})\dot{Y} + (H - h_{Ti})\dot{H}}{R_{Ti}}. \quad (21)$$

На основании (21) составим матрицу

$$A_{\dot{R}\Sigma} = \begin{bmatrix} \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{T1})\dot{X}}{R_{T1}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{T1})\dot{Y}}{R_{T1}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{T1})\dot{H}}{R_{T1}} \\ \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{T2})\dot{X}}{R_{T2}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{T2})\dot{Y}}{R_{T2}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{T2})\dot{H}}{R_{T2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{X\dot{X}}{R_R} + \frac{(X-x_{TN})\dot{X}}{R_{TN}} & \frac{Y\dot{Y}}{R_R} + \frac{(Y-y_{TN})\dot{Y}}{R_{TN}} & \frac{H\dot{H}}{R_R} + \frac{(H-h_{TN})\dot{H}}{R_{TN}} \end{bmatrix}$$

и определим искомые параметры как  $\dot{Z}_R = (A_{\dot{R}\Sigma}^T A_{\dot{R}\Sigma})^{-1} A_{\dot{R}\Sigma}^T \dot{S}_{R\Sigma}$ , учитывая, что расчет проекций вектора скорости ВО в этом случае подразумевает предварительное определение прямоугольных координат и наклонных дальностей. Полученные формулы подразумевают алгоритм угломерно-суммарно-дальномерной системы при N передающих позициях.

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА В ПОЛИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Точность оценки местоопределения координат воздушной цели [14, 17] определяется по зависимости  $\sigma_S = \sqrt{\text{tr}(G_S^T W_S^{-1} G_S)^{-1}}$ ,  $\text{tr}$  – след матрицы, а

$$G_S = \begin{bmatrix} \frac{X}{R_R} + \frac{X-x_{T1}}{R_{T1}} & \frac{Y}{R_R} + \frac{Y-y_{T1}}{R_{T1}} & \frac{H}{R_R} + \frac{H-h_{T1}}{R_{T1}} \\ \frac{X}{R_R} + \frac{X-x_{T2}}{R_{T2}} & \frac{Y}{R_R} + \frac{Y-y_{T2}}{R_{T2}} & \frac{H}{R_R} + \frac{H-h_{T2}}{R_{T2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{Y}{R_g^2} & -\frac{X}{R_g^2} & 0 \\ -\frac{HX}{R_g R_R^2} & -\frac{HY}{R_g R_R^2} & \frac{R_g}{R_R^2} \end{bmatrix},$$

где  $R_g$  – горизонтальная дальность до цели,  $W_S = \text{diag}[\sigma_{R\Sigma 1}^2, \sigma_{R\Sigma 2}^2, \sigma_{R\Sigma i}^2 \dots \sigma_\epsilon^2, \sigma_\beta^2]$  – матрица точности, которую для простоты представим диагональной,  $\sigma_{R\Sigma}^2$ ,  $\sigma_\epsilon^2$ ,  $\sigma_\beta^2$  – дисперсии измерения суммарных дальностей и угловых координат.

На рис. 2, а–е приведены среднеквадратические ошибки определения местоположения при ошибках первичных измерений  $\sigma_{R\Sigma} = 50$  м,  $\sigma_\epsilon = 1$  град.,  $\sigma_\beta = 1$  град. (рис. 2, а–е) и при ошибках первичных измерений  $\sigma_{R\Sigma} = 50$  м,  $\sigma_\epsilon = 4$  град.,  $\sigma_\beta = 4$  град. (рис. 2, з–е) при различных соотношениях горизонтальной дальности до объекта  $R_g$  и расстоянии до передающих позиций от начала координат L.

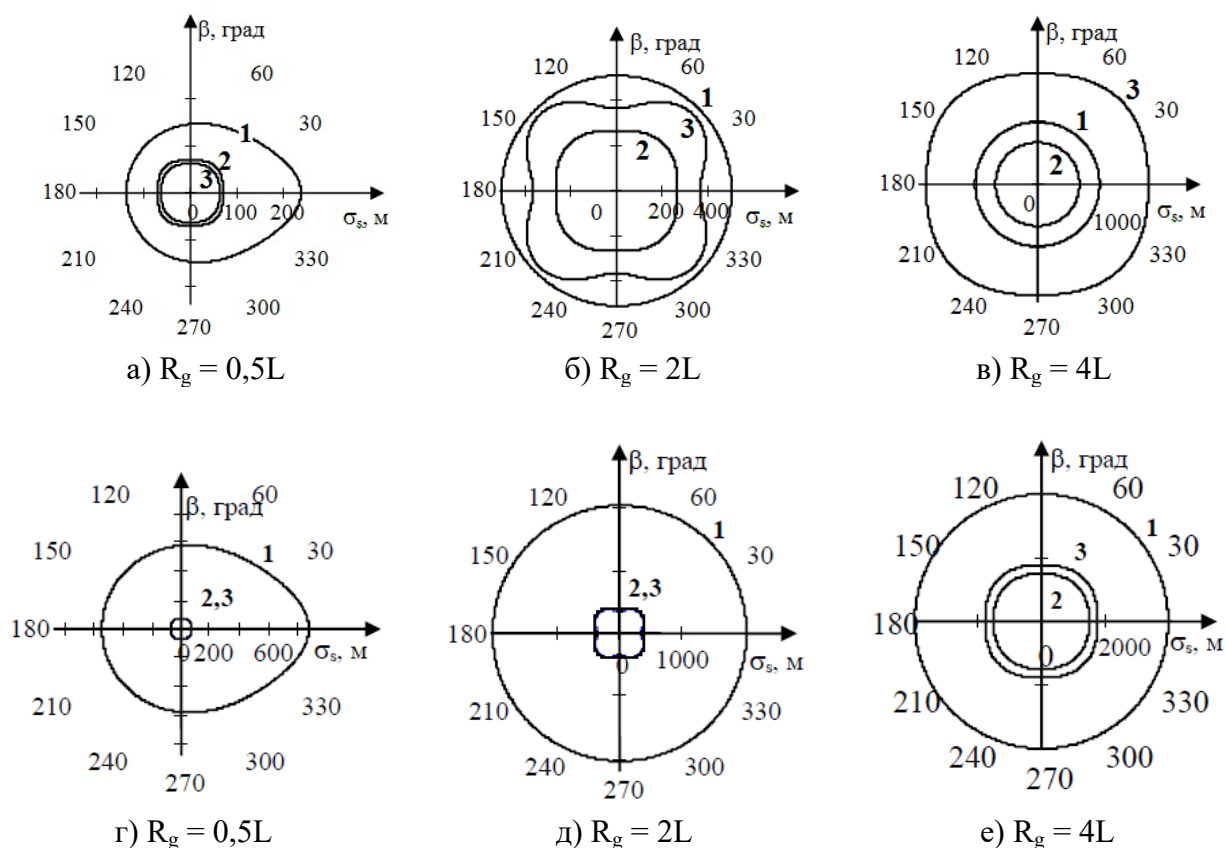


Рис. 2. Среднеквадратические ошибки определения местоположения воздушного объекта

Fig. 2. Mean square errors in the location of an air object

На рисунках цифрами обозначены среднеквадратические ошибки определения местоположения ВО для: 1 – суммарно-дальномерно-угломерной системы при одной передающей позиции, 2 – суммарно-дальномерно-угломерной системы при четырех передающих позициях; 3 – суммарно-дальномерной системы при четырех передающих позициях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены аналитические выражения для определения координат и параметров движения воздушных объектов для различного состава первичных измерений в многопозиционной радиолокационной системе, использующей сторонние источники излучения. Отметим, что полученные алгоритмы для суммарно-дальномерных систем позволяют определять прямоугольные координаты и вектор скорости цели по результатам оценивания суммарно-дальномерных систем и доплеровской частоты за один такт обработки измерений при минимальном количестве передающих позиций.

Показано, что точность определения местоположения воздушного объекта существенно зависит от геометрического фактора точности и ошибок первичных измерений. Наличие угломерных измерений в большинстве случаев обеспечивает более высокую точность измерений при использовании  $N$  передатчиков. Увеличение количества передающих позиций, участвующих в обработке переотраженных воздушными объектами сигналов, приводит к повышению точности определения местоположения даже при низкой точности оценивания угловых координат.

Реализация процедур обнаружения-измерения в радиолокационной системе такого типа требует перекрытия зон обзора и потенциала передающих систем, достаточного для достижения высокой вероятности обнаружения. При отсутствии на приемной позиции измерений угловых координат возможны сложности с отождествлением воздушных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bendjama L., Laroussi T.** GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity // 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET). 2018. Pp. 54–59. DOI:10.1109 / ASET.2018.8379834.
2. **Capria A.** DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment / D. Petri, M. Martorella, M. Conti, E. Dalle Mese, F. Berizzi // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2010. Pp. 3917–3920. DOI:10.1109/ IGARSS.2010.5649675.
3. **Howland P.E., Maksimiuk D., Reitsma G.** FM radio based bistatic radar // IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation. 2005. Pp. 107–115. DOI:10.1049/ip-rsn: 20045077.
4. **Zaimbashi A., Derakhtian M., Sheikhi A.** Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2014. Pp. 720–736. DOI:10.1109 / TAES.2013.120248.
5. **Conti M.** High range resolution multichannel DVB-T passive radar / F. Berizzi, M. Martorella, E. Dalle Mese, D. Petri, A. Capria // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2012. Pp. 37–42.
6. **Conti M.** Ambiguity function sidelobes mitigation in multichannel DVB-T Passive Bistatic Radar / D. Petri, A. Capria, M. Martorella, F. Berizzi, E. Dalle Mese // 12th International Radar Symposium (IRS). 2011. Pp. 339–344.
7. **Christiansen J.M., Olsen K.E.** Range and Doppler walk in DVB-T based Passive Bistatic Radar // IEEE Radar Conference. 2010. Pp. 620–626. DOI:10.1109/RADAR.2010.5494548.
8. **Samczyński P., Wilkowski M., Kulpa K.** Trial results on bistatic passive radar using non-cooperative pulse radar as illuminator of opportunity // INTL – International Journal of Electronics and Telecommunications. 2012. Pp. 171–176.
9. **Honda J., Otsuyama T.** Feasibility study on aircraft positioning by using ISDB-T signal delay // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter. 2016. Pp. 1787–1790.
10. **Krysiak P.** Doppler-only tracking in GSM-based passive radar / M. Wielgo, J. Misiurewicz, A. Kurowska // 17th International Conference on Information Fusion (FUSION). 2014. Pp. 1–7.
11. **Howland P.E.** Target tracking using television-based bistatic radar // IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation. 1999. Pp. 166–174.
12. **Salah A.** Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications / Abdullah R.S.A. Raja, A. Ismail, F. Hashim, Aziz N.H. Abdul // Electronics Letters. 2014. Pp. 545–547. DOI:10.1049/el.2014.0237.
13. **Аверьянов В.Я.** Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Техника, 1978. 148 с.
14. **Черняк В.С.** Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
15. **Охрименко А.Е.** Основы обработки и передачи информации. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1990. 180 с.
16. **Борисов Е.Г., Поддубный С.С.** Применение пространственно-временных сигналов для определения координат целей в бистатической локационной системе // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 1. С. 9–14.
17. **Машков Г.М., Борисов Е.Г., Владыко А.Г.** Анализ точности определения местоположения объектов дальномерными системами различного типа // Авиационная техника. Сер. Известия высших учебных заведений. 2015. № 4. С. 401–406.

18. Kulpa K., Malanowski M. Two Methods for Target Localization in Multistatic Passive Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2012. Vol. 48, № 1. Pp. 572–580. DOI:10.1109/TAES.2012.6129656.

19. Mellen G., Pachter M., Raquet J. Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurements // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2003. July. Pp. 1056–1058. DOI:10.1109/TAES.2003.1238756.

20. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

21. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. Радио, 1974. 432 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Борисов Евгений Геннадьевич**, доктор технических наук, доцент, главный специалист по реализации инвестиционных и научно-технических проектов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, begspb1967@mail.ru.

## DETERMINATION OF THE LOCATION OF AIR OBJECTS IN POLISTATIC RADAR SYSTEM PARASITISING ON RADIATION TELECOMMUNICATION SYSTEMS

**Evgeny G. Borisov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunication  
(SUT), Saint-Petersburg, Russia*

### ABSTRACT

Currently, in areas of large cities there is a steady trend towards an increase in the spatial density of telecommunications systems. Saturation of the radio spectrum with analogue and digital systems used to solve problems of radio communication and television allows on their basis improving the technologies for semi-active radar detecting and determining the coordinates of air objects. The introduction of radar surveillance using transmitters not intended for radar purpose is often called a semi-active radar using outside or “parasitic” emission sources. The advantages of the systems are the minimization of the deployment costs, low operational energy costs, a low probability of establishing distortions, stealth operation, environmental friendliness and lack of requirements for radio frequency resource allocation. The relatively large elevations of the antennas of communication and television transmitters with the existing emitted power create favorable conditions for the detection of low altitude air objects. The digital signals of modern telecommunications systems have a spectrum width that provides acceptable resolution and accuracy for measuring the full range and angular coordinates. In general, a system of this type is a poly-static (multi-static) system consisting of one or more radiation sources and one or more receiving positions scattered in space. The promising task such systems solve along with airspace control is air traffic control. The article considers options for determining the rectangular coordinates of air objects in a system of bistatic radar stations using radio emission from external sources for target detection. The variants of the location of air objects with different composition of primary measurements of coordinates and a number of transmitting positions are considered. Analytical expressions are given for calculating the projections of the target velocity vector on the axis of the Cartesian coordinate system. The accuracy of airborne positioning for multi-static radar systems of this type is estimated.

**Key words:** bistatic location, least square method, total long distance, angular measurements, locate positions, accuracy, semi-active radiolocation.

## REFERENCES

1. **Bendjama, L. and Laroussi, T.** (2018). *GLRT-based passive bistatic radar: A performance comparison of illuminators of opportunity*. 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET). pp. 54–59. DOI:10.1109 / ASET.2018.8379834.
2. **Capria, A., Petri, D., Martorella, M., Conti, M., Dalle Mese, E. and Berizzi, F.** (2010). *DVB-T passive radar for vehicles detection in urban environment*. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3917–3920. DOI:10.1109/ IGARSS.2010.5649675.
3. **Howland, P.E., Maksimiuk, D. and Reitsma, G.** (2005). *FM radio based bistatic radar*. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation, pp. 107–115. DOI:10.1049/ip-rsn: 20045077.
4. **Zaimbashi, A., Derakhtian, M. and Sheikhi, A.** (2014). *Invariant Target Detection in Multiband FM-Based Passive Bistatic Radar*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 720–736. DOI:10.1109 / TAES.2013.120248.
5. **Conti, M., Berizzi, F., Martorella, M., Dalle Mese, E., Petri, D. and Capria, A.** (2012). *High range resolution multichannel DVB-T passive radar*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, pp. 37–42.
6. **Conti, M., Petri, D., Capria, A., Martorella, M., Berizzi, F. and Dalle Mese, E.** (2011). *Ambiguity function sidelobes mitigation in multichannel DVB-T Passive Bistatic Radar*. 12th International Radar Symposium (IRS), pp. 339–344.
7. **Christiansen, J.M. and Olsen, K.E.** (2010). *Range and Doppler walk in DVB-T based Passive Bistatic Radar*. IEEE Radar Conference, pp. 620–626. DOI:10.1109/RADAR.2010.5494548.
8. **Samczyński, P., Wilkowski, M. and Kulpa, K.** (2012). *Trial results on bistatic passive radar using non-cooperative pulse radar as illuminator of opportunity*. INTL – International Journal of Electronics and Telecommunications, pp. 171–176.
9. **Honda, J. and Otsuyama, T.** (2016). *Feasibility study on aircraft positioning by using ISDB-T signal delay*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, pp. 1787–1790.
10. **Krysiak, P., Wielgo, M., Misiurewicz, J. and Kurowska, A.** (2014). *Doppler-only tracking in GSM-based passive radar*. 17th International Conference on Information Fusion (FUSION), pp. 1–7.
11. **Howland, P.E.** (1999). *Target tracking using television-based bistatic radar*. IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation, pp. 166–174.
12. **Salah, A., Raja Abdullah, R.S.A., Ismail, A., Hashim, F. and Abdul Aziz, N.H.** (2014). *Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications*. Electronics Letters, pp. 545–547. DOI:10.1049/el.2014.0237.
13. **Averyanov, V.Ya.** (1978). *Raznesennye radiolokatsionnye stantsii i sistemy* [Separated radar stations and systems]. Minsk: Tekhnika, 1978, 148 p. (in Russian)
14. **Chernyak, V.S.** (1993). *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multi-position Radiolocation], Moscow: Radio i Svyaz, 1993, 416 p. (in Russian)
15. **Okhrimenko, A.E.** (1990). *Osnovy obrabotki i peredachi informatsii* [Fundamentals of information processing and transmission]. Minsk: MVIZRU PVO, 1990, 180 p. (in Russian)
16. **Borisov, E.G. and Poddubnyy, S.S.** (2017). *Primenenie prostranstvenno-vremennykh signalov dlya opredeleniya koordinat tselei v bistaticheskoy lokatsionnoy sisteme* [Application of space-time signals for the determination of target coordinates in a bistatic location system]. *Voprosy radioelektroniki* [Problems of radio-electronics], no. 1, pp. 9–14. (in Russian)
17. **Mashkov, G.M., Borisov, E.G. and Vladyko, A.G.** (2015). *Analiz tochnosti opredeleniya mestopolozheniya obyektov dalnomernymi sistemami razlichnogo tipa* [Analysis of Object Positioning Accuracy provided by range-finding systems of various types]. Russian Aeronautics, pp. 401–406. DOI: 10.3103/S1068799815040078. (in Russian)

**18. Kulpa, K. and Malanowski, M.** (2012). *Two Methods for Target Localization in Multi-static Passive Radar*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 48, no. 1, pp. 572–580. DOI:10.1109/TAES.2012.6129656.

**19. Mellen, G., Pachter, M. and Raquet, J.** (2003). *Closed-form solution for determining emitter location using time difference of arrival measurements*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, July, pp. 1056–1058. DOI:10.1109/TAES.2003.1238756.

**20. Shirman, Ya.D. and Manzhos, V.N.** (1981). *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh* [Theory and technique of processing radar information against background noise]. Moscow: Radio i svyaz, 416 p. (in Russian)

**21. Kuzmin, S.Z.** (1974). *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii* [Fundamentals of the theory of digital processing of radar information]. Moscow: Sov. Radio, 432 p. (in Russian)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Evgeny G. Borisov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Specialist on the Implementation of Investment and Scientific Technical Projects, Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, begspb1967@mail.ru.

Поступила в редакцию 06.07.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 06.07.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 551.:629.130

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Э.А. БОЛЕЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

Метеорологическое обеспечение полетов (МОП) гражданской авиации (ГА) является одним из видов обеспечения полетов и осуществляется в целях обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов путем предоставления требуемой метеорологической информации пользователям воздушного пространства, органам, осуществляющим организацию воздушного движения. Основу международного и национального регулирования МОП ГА составляют рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) и ИКАО, а также Федеральные авиационные правила и другие нормативные и руководящие документы. В Российской Федерации МОП ГА осуществляет «Авиаметтелеком Ростгидромета», который представляет собой организацию с регионально-распределенной сетью структурных подразделений, включающих головную организацию и 15 филиалов. Непосредственное метеорологическое обеспечение осуществляют аэродромные метеорологические органы. В настоящее время в МОП ГА существует ряд проблем, а именно: наличие нормативно-правовых актов и норм, позволяющих использование авиационными потребителями метеорологической информации, поставляемой вне официально уполномоченных провайдеров метеорологической информации; недостаточная техническая оснащенность современным метеоборудованием аэродромных метеорологических органов; моральное старение существующих технических средств проведения метеонаблюдений и предоставления метеорологической информации; нехватка квалифицированных специалистов-метеорологов; сокращение подразделений «Авиаметтелеком Ростгидромета»; для ряда регионов Российской Федерации отсутствие достоверных методов прогноза погоды и опасных явлений погоды для авиации; недостаточное покрытие территории страны сетью метеорологических радиолокационных станций и аэрологических станций. Основные пути совершенствования МОП ГА должны идти по нескольким направлениям одновременно: совершенствование нормативно-правовой базы МОП ГА; разработка и внедрение современных технических средств проведения метеонаблюдений и измерений; разработка и внедрение систем автоматизированного прогнозирования на основе современных численных методов и методик прогнозирования; централизация процессов прогнозирования и обмена метеоинформацией.

**Ключевые слова:** авиационный прогноз погоды, метеорологическое обеспечение полетов, аэродромный метеорологический орган, провайдер метеорологической информации, метеосводка, беспилотный метеоразведчик, опасные метеорологические явления.

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральными авиационными правилами «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации»<sup>1</sup> метеорологическое обеспечение полетов (МОП) гражданской авиации (ГА) является одним из видов обеспечения полетов и осуществляется в целях обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов путем предоставления требуемой метеорологической информации пользователям воздушного пространства, органам, осуществляющим организацию воздушного движения. Основу международного и национального регулирования МОП ГА составляют рекомендации Всемирной метеорологической организации (ВМО) и ИКАО, а также Федеральные авиационные правила (ФАП) и Положения в области метеорологического обеспечения.

ФАП «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов»<sup>2</sup> определяют понятие метеорологического органа и провайдера метеорологиче-

<sup>1</sup> Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации: федеральные авиационные правила: утв. приказом Минтранса РФ № 128 от 31.07.2009 г.

<sup>2</sup> Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов: федеральные авиационные правила: утв. приказом Минтранса РФ № 60 от 18.09.2014 г.

ской информации. Метеорологический орган – орган, осуществляющий наблюдение за метеорологическими параметрами, их обработку и предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов ВС. Провайдер метеорологической информации – это физическое или юридическое лицо, предоставляющее метеорологическую информацию для обеспечения полетов ВС. В Российской Федерации ответственность за МОП ГА лежит на метеорологическом полномочном органе, которым является Росгидромет. Оперативно-производственным учреждением Росгидромета, осуществляющим МОП ГА по российским и международным авиалиниям, полетов первых лиц государства и глав иностранных государств, делегаций органов государственной власти федерального и регионального уровня и подобных, является ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

Настоящая статья посвящена анализу МОП ГА в Российской Федерации и выявлению проблем, в первую очередь организационно-технических, требующих решения.

## **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» представляет собой организацию с регионально-распределенной сетью структурных подразделений, осуществляющих метеорологическое обслуживание ГА в рамках единого пространства в интересах авиационных пользователей. Структура ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», включающая головную организацию и 15 филиалов, максимально приближена к структуре авиационных пользователей.

Непосредственное метеорологическое обеспечение осуществляют аэродромные метеорологические органы, к которым относятся: авиационные метеорологические центры (АМЦ); авиационные метеорологические станции (гражданские) с синоптической частью (АМСГ I, II, III разряда); авиационные метеорологические станции (гражданские) без синоптической части (АМСГ IV разряда); оперативные группы (ОГ), размещенные в аэропортах и на аэродромах РФ. На рис. 1 приведен пример построения структуры аэродромных метеорологических органов филиала «Авиаметтелеком Росгидромета».

Основной из перечисленных структур является АМСГ, которая с учетом разряда, присвоенного ей, обеспечивает экипажи ВС, работников службы УВД и аэродромной службы необходимой метеорологической информацией в объеме, предусмотренном ФАП «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов». Особенностью АМСГ IV разряда является то, что эти станции не имеют синоптической группы, а техник-метеоролог получает от закрепленного АМЦ или АМСГ более высокого разряда прогнозы погоды по своему аэродрому.

Аэродромные метеорологические органы (АМЦ, АМСГ) получают метеорологическую информацию от других метеорологических органов, включая авиационные прогностические карты погоды зональных авиаметеорологических центров (ЗАМЦ), главного авиаметеорологического центра (ГАМЦ), регионального центра зональных прогнозов (РЦЗП), а также данных зарубежных метеорологических органов и банков оперативных метеорологических данных, к которым относятся [1, 3]:

- два всемирных центра зональных прогнозов (ВЦЗП) для обеспечения глобальными прогнозами по параметрам ветра на высотах и температуре, а также по особым явлениям погоды на маршруте полета для верхних слоев атмосферы;
- девять консультативных центров по вулканическому пеплу (ВААС) для предоставления консультативной информации относительно вертикальной и горизонтальной мощности и прогнозируемого перемещения пепла в атмосфере после вулканических извержений;
- семь консультативных центров по тропическим циклонам (ТСАС) для предоставления консультативной информации относительно местонахождения, прогнозируемого перемещения и интенсивности тропических циклонов.

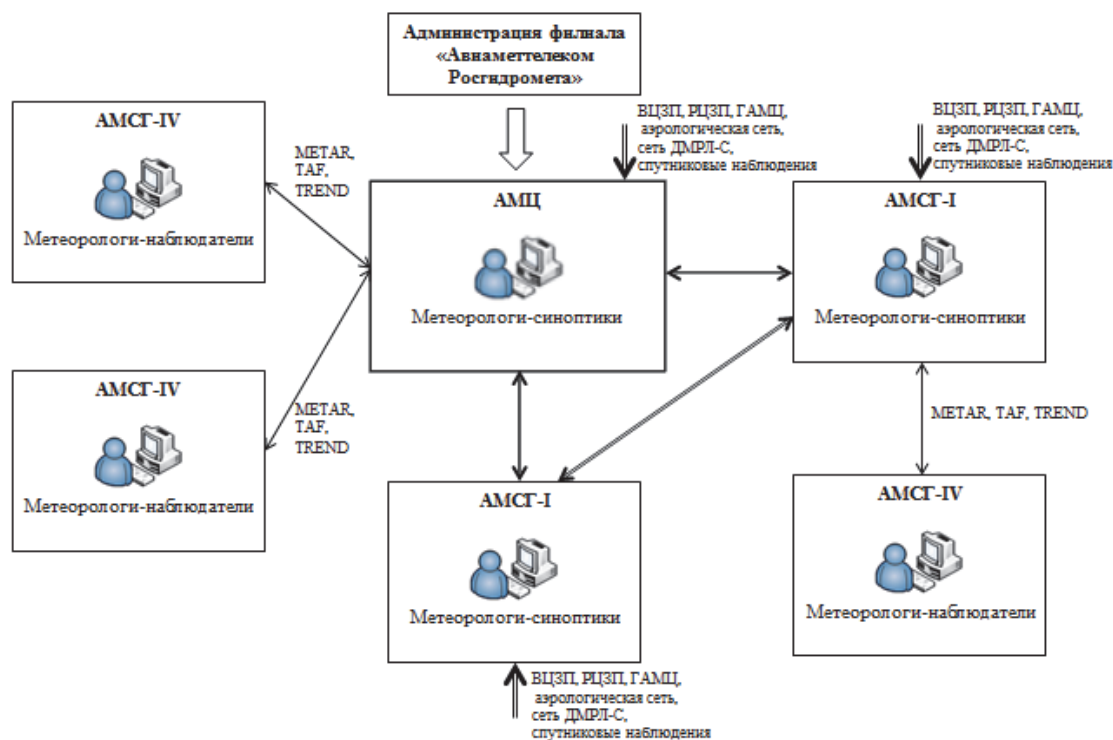


Рис. 1. Структура аэродромных метеорологических органов в филиале  
Fig. 1. The structure of the airport meteorological bodies in the branch

Кроме этого, аэродромные метеорологические органы с синоптической частью получают метеоинформацию от сети метеорологических радиолокационных станций (ДМРЛ-С и МРЛ-5), спутниковой метеорологической сети.

Специалисты АМСГ отвечают:

- за своевременность и качество МОП;
- за качество наблюдений на аэродроме и своевременность передачи данных этих наблюдений заинтересованным работникам ГА;
- за правильность ведения всей метеорологической документации;
- за правильность оформления и своевременность передачи телеграмм на узлы связи;
- за содержание метеорологических приборов и установок в исправном состоянии.

Метеорологическая информация предоставляется АМСГ потребителям в виде метеорологических наблюдений, сводок, прогнозов погоды и предупреждений<sup>3</sup>. Предоставление метеорологической информации экипажам ВС осуществляется диспетчером службы УВД и аэродромным метеорологическим органом (АМЦ, АМСГ). Экипажам ВС предоставляется следующая метеорологическая информация:

- карта особых явлений погоды SWH между эшелонами полета 250 и 630 и прогностическая карта ветра и температуры для эшелона 350 (250 гПа);
- карта особых явлений погоды SWM между эшелонами полета 100 и 250 и прогностическая карта ветра и температуры для эшелона 180 (500 гПа);
- карта особых явлений погоды и прогностическая карта ветра и температуры для абсолютных высот 600 метров (эшелон 020), 1500 метров (эшелон 050), 3000 метров (эшелон 100) и 4500 метров (эшелон 150) в горных районах.

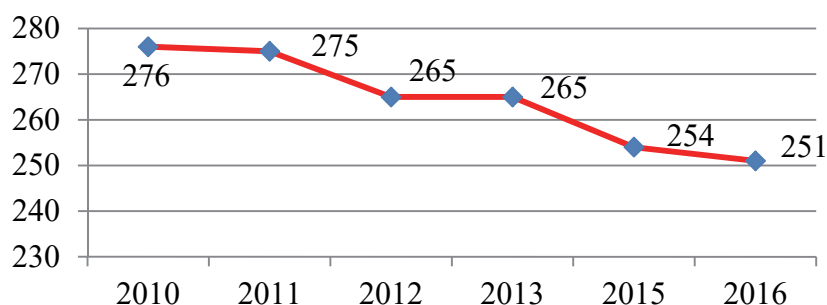
По требованию экипажа ВС (эксплуатанта) ему могут быть предоставлены дополнительные прогнозы температуры, ветра и особых явлений по высотам. Экипажи ВС, находящиеся

<sup>3</sup> Сводки и прогнозы по аэродрому: пособие для пользования кодами. ВМО № 782. 5-е изд. 2008.

в полете, обеспечиваются метеорологической информацией через орган УВД, или посредством ATIS, или радиовещательными передачами VOLMET, которые содержат:

- сводки METAR с прогнозами на посадку TREND (непрерывные передачи);
- сводки METAR и SPECI с прогнозами TREND, TAF, SIGMET (регулярные передачи).

С 24.03.2017 вступил в силу Приказ Минтранса РФ № 34, который отменил метеорологический сбор, а оплату услуг по метеообеспечению включил в аэронавигационный сбор, тем самым переложив обязанность по сбору, обработке, передаче и предоставлению метеоинформации на Госкорпорацию по организации воздушного движения. Данная инициатива была поддержана большинством авиакомпаний, при этом суть позиции Минтранса России заключается в том, что включение расходов за метеорологическое обслуживание в ставки сборов за аэронавигационное обслуживание и отказ от практики заключения обязательных прямых договоров с уполномоченными Росгидрометом поставщиками услуг по предоставлению метеорологической информации позволит обеспечить централизованное финансирование содержания единого банка метеоинформации, необходимой для планирования и выполнения полетов в воздушном пространстве Российской Федерации, а это, в свою очередь, позволит обеспечить свободный доступ к ней неограниченному кругу заинтересованных лиц и будет способствовать повышению безопасности и регулярности полетов. Однако, как показала практика, такая система не покрывает затраты метеорологических подразделений на производство, сбор, обработку, анализ и передачу авиационным пользователям метеоинформации и не соответствует расходам «Авиаметтелеком Росгидромета». Все это приводит к сокращению численности специалистов АМСГ и, как следствие, переводу на работу по регламенту, а также закрытию ряда АМСГ и ОГ. По данным «Авиаметтелеком Росгидромета»<sup>4</sup>, количество оперативных подразделений Росгидромета с 2010 по 2016 год сократилось на двадцать пять (рис. 2), причем практически ежегодно часть АМСГ с синоптической частью (I, II и III разрядов) переводятся в АМСГ без синоптической части (IV разряд). Так, например, за 2015 год восемь АМСГ с синоптической частью были переведены в АМСГ IV разряда.



**Рис. 2.** Количество оперативных подразделений ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»  
**Fig. 2.** The number of operational units of the FGBU "Aviamettelekom of Roshydromet"

Основной заявленной причиной сокращения численности оперативных подразделений «Авиаметтелеком Росгидромета» является проводимая оптимизация структуры метеорологической сети в рамках модернизации ЕС ОрВД, однако эта «оптимизация» подчас связана со старением технических средств проведения метеонаблюдений; с недостатком финансирования на модернизацию АМСГ; с нехваткой квалифицированных специалистов-метеорологов. Данная проблема затрагивает в первую очередь отдаленные аэродромы/вертодромы и аэродромные площадки в районах Крайнего Севера и Арктики.

<sup>4</sup> Авиационное метеообеспечение. Отчеты [Электронный ресурс] // ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»: офиц. сайт. Режим доступа: [http://www.aviamettelecom.ru/index.php?id\\_top=30](http://www.aviamettelecom.ru/index.php?id_top=30) (дата обращения: 12.05.2018).

Кроме этого, в Росгидромете признают тот факт, что сейчас в сфере МОП ГА сложилась ситуация, когда не только пилоты-любители, но и авиакомпании получают метеоинформацию не от органов «Авиаметтелеком Росгидромета», а из сети Интернет у иностранных провайдеров метеоинформации. Зачастую это международные поставщики: SITA (Швейцария), Jeppesen (США; входит в Boeing), Lido (Германия), JetPlanning (Германия). Причем эти провайдеры в своих коммерческих продуктах используют метеорологическую информацию Росгидромета, которую получают из всемирного фонда данных, куда Росгидромет, в соответствии с требованиями ИКАО и ВМО, передает метеоинформацию на безвозмездной основе. Данная ситуация стала возможной после утверждения Минтрансом России ФАП «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации». В первых редакциях данных ФАП определялось, что командир воздушного судна может самостоятельно определять источники получения метеорологической информации, которые он посчитает достоверными. При этом в ФАП не определяются критерии этой «достоверности». Решением Верховного Суда РФ от 09.02.2015 № АКПИ14-1451 в п. 2.8 были внесены изменения, которые определили официальный источник метеорологической информации – ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», и другие источники метеорологической информации, однако принципиально ничего не изменили, у командира воздушного судна по-прежнему сохраняется право выбора источника метеоинформации, который он посчитает достоверным.

Следует отметить, что привлечение иностранных провайдеров метеорологической информации в такую стратегически важную сферу, как МОП ГА, может затронуть национальные интересы России в информационной сфере [6]. Кроме этого, уместно сказать, что различные метеорологические сервисы, в том числе и зарубежные, в настоящее время соревнуются между собой больше в наглядности представляемой метеоинформации, а не в ее достоверности и целостности.

Недостаточное финансирование ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» приводит к тому, что у его подразделений не хватает современного метеооборудования для конкуренции с иностранными поставщиками метеоинформации. Плотность существующих метеостанций у ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» сегодня такова, что получаемая от них фактическая метеоинформация в ряде регионов России, особенно это касается Крайнего Севера, Арктики, отдельных районов Дальнего Востока, является недостаточной для составления качественных авиационных прогнозов погоды. То, что сегодня предоставляет ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», является кусочками разрозненной информации. Так, например, АМСГ может дать информацию о фактической погоде в аэропорту Тазовский (узловой аэропорт ЯНАО) и Стрежевой (Томская область), а в промежутке между ними метеоинформация может отсутствовать [5].

Кроме этого, для «Авиаметтелеком Росгидромета» проблемой стали:

- устаревшие технологии предоставления метеорологической информации, не позволяющие сотрудникам АМСГ (АМЦ) и авиационным пользователям получать необходимую метеоинформацию своевременно;
- нехватка квалифицированных специалистов-метеорологов АМСГ (АМЦ), а также низкая исполнительская и трудовая дисциплина.

Все это усугубляется: отсутствием разветвленной сети метеорологических радиолокационных станций типа ДМРЛ-С; старением оборудования сети аэрологического радиозондирования и, как следствие, временным прекращением работы отдельных аэрологических станций; недостаточным использованием данных спутниковой метеорологической сети.

В соответствии с ФЦП «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки на территории Российской Федерации на 2008–2015 гг.» и «Модернизация единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020 гг.)» сеть ДМРЛ-С к 2020 году должна включать 140 радиолокаторов (рис. 3).

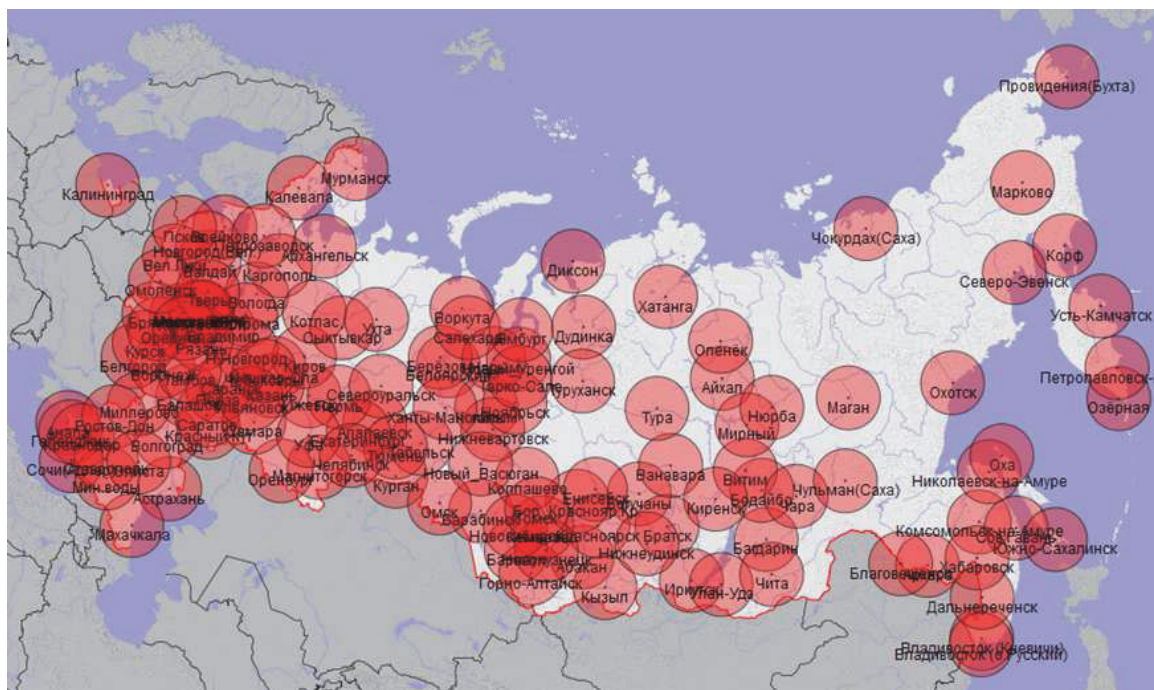
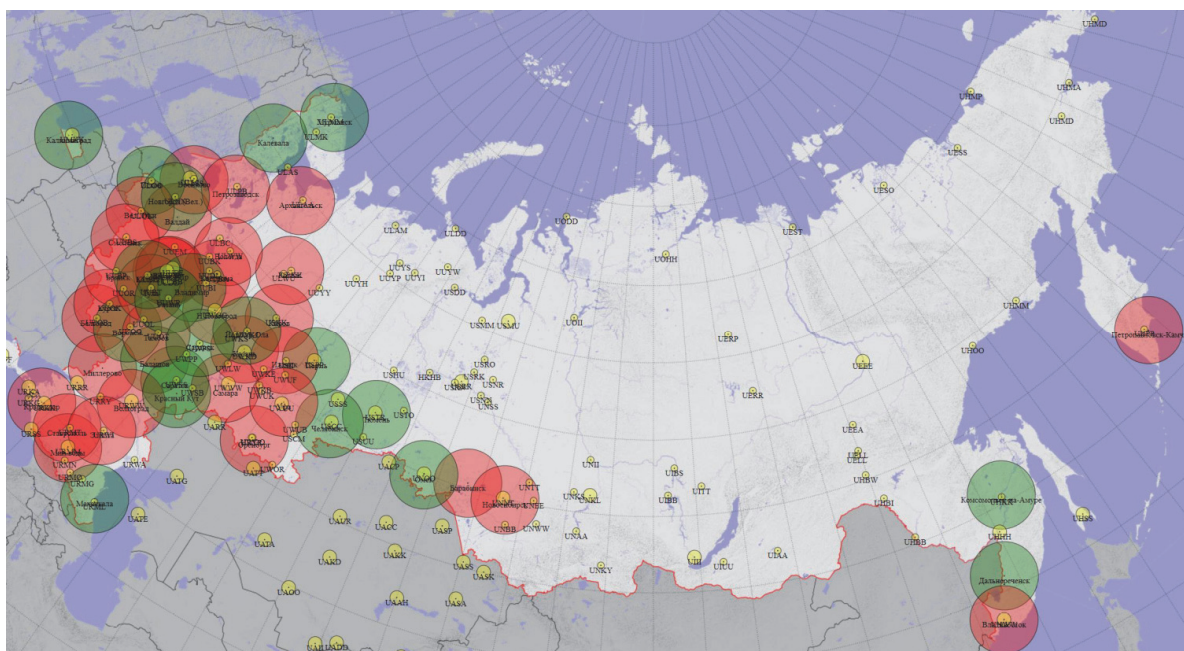


Рис. 3. Карта расположения позиций ДМРЛ-С  
Fig. 3. Location map of the positions of the DMRL-C

Однако в настоящее время темпы реализации этих ФЦП явно не соответствуют заданным. По состоянию на 2017 год введены в эксплуатацию только 34 ДМРЛ-С, а к концу 2019 года планируется ввод в эксплуатацию еще 22 ДМРЛ-С. На рис. 4 представлена карта размещения действующих и строящихся позиций ДМРЛ-С (красный цвет – действующие ДМРЛ-С, зеленый цвет – строящиеся ДМРЛ-С).

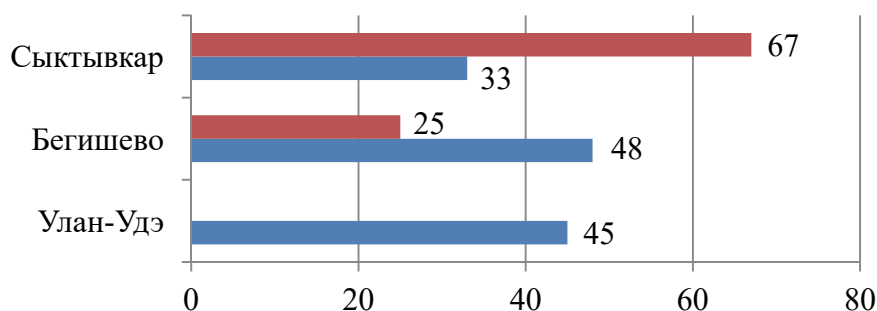
Таким образом, к концу 2019 года ФЦП будет выполнена менее чем на половину. Однако и после успешной реализации ФЦП, на территории РФ говорить о создании единой системы радиолокационного мониторинга погоды не приходится. Как видно из рис. 3, арктические районы, часть районов Крайнего Севера и Дальнего Востока не попадают в зону радиолокационного покрытия ДМРЛ-С, поэтому проблемы мониторинга метеобстановки затрагивают в первую очередь аэродромы (вертодромы) и аэродромные площадки в этих районах. Так, например, в настоящее время в состав Северного филиала ФГБУ «Авиаметтеком Росгидромета» входит 28 подразделений, причем более половины из них без синоптической части. При этом зона ответственности Северного филиала включает в себя Архангельскую и Вологодскую области, Республику Коми, Ненецкий автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ и Таймырский район Красноярского края. Синоптики-прогнозисты при составлении авиационных прогнозов погоды вынуждены пользоваться редкими данными наземных метеостанций, а при их отсутствии полагаться только на свой практический опыт работы и общие сведения о климате этих регионов. Ситуация усугубляется еще и тем, что в этих регионах имеющаяся сеть аэрологических станций не позволяет качественно решать задачи разработки авиационных прогнозов погоды, практически нет достаточно надежных методов прогноза опасных явлений погоды, а качественная и количественная оценка при их прогнозировании не всегда дает положительные результаты в отношении устойчивости суточных колебаний метеопараметров атмосферы и явлений.

Особенностью организации МОП ГА в Российской Федерации является то, что российские метеорологи-синоптики несут личную ответственность за прогнозы погоды, а следовательно, склонны проявлять консерватизм и нередко дают «перестраховочные» прогнозы, т. е.



**Рис. 4.** Карта размещения действующих и строящихся ДМРЛ-С  
**Fig. 4.** Map of location of existing and under construction DMRL-C

предсказывают более ненастную погоду, чем ожидается на самом деле, ссылаясь на возможный штормовой ветер, град, ливневые осадки или другие ОМЯ [3, 4, 8]. На рис. 5 приведены данные о «перестраховочных» прогнозах по скорости ветра (красный) и высоте нижней границы облаков (ВНГО) (синий) для аэродромов Улан-Удэ, Бегишево, Сыктывкар, которые свидетельствуют о том, что практически половина прогнозов погоды являются «перестраховочными». Такая ситуация не может не сказываться на регулярности и безопасности полетов ГА.



**Рис. 5.** Доля «перестраховочных» прогнозов по скорости ветра и ВНГО  
**Fig. 5.** The share of "reinsurance" forecasts for wind speed and the height of the lower cloud boundary

Кроме этого, в подавляющем числе АМСГ используются технологии разработки метеопрогнозов, основанные в основном на ручных методах, предложенных еще в середине 70-х годов прошлого века. Главное содержание работы синоптика – ручной анализ фактических карт погоды и прогностических карт и составление по ним метеопрогнозов. Качество метеопрогнозов в данном случае во многом основано на личном опыте и интуиции синоптика (не менее 5 лет работы на аэродроме) [1]. Для ряда регионов России точных количественных методик авиационных прогнозов практически нет. Метеорологи-синоптики на АМСГ (АМЦ) до сих пор пользуются Руководством по прогнозированию метеорологических условий для авиации

1985 года. Кроме этого, ручной метод требует больших затрат времени, на анализ материала и составление качественного прогноза уходит до нескольких часов кропотливого труда.

Таким образом, в настоящее время в МОП ГА существует ряд проблем, основными из которых являются:

- наличие в нормативно-правовых актах норм, позволяющих использование КВС метеорологической информации, поставляемой вне официально уполномоченных организаций или с использованием не рекомендованных уполномоченными органами исполнительной власти провайдеров метеорологической информации;
- недостаточная техническая оснащенность современным метеооборудованием АМСГ (АМЦ) и ОГ;
- моральное старение существующих технических средств проведения метеонаблюдений на АМСГ (АМЦ) и ОГ и технологий предоставления метеорологической информации;
- практическое отсутствие информационно-технических средств получения метеоинформации, позволяющих специалистам АМСГ (АМЦ) и авиационным пользователям получать требуемую метеоинформацию своевременно;
- нехватка квалифицированных специалистов-метеорологов АМСГ (АМЦ) и ОГ, а в некоторых АМСГ (АМЦ, ОГ, ОСГ) низкая квалификация специалистов;
- сокращение подразделений «Авиаметтелеком Росгидромета» и перевод части АМСГ с синоптической частью в АМСГ IV разряда;
- для ряда регионов Российской Федерации отсутствие достоверных методов прогноза погоды и опасных явлений погоды для авиации;
- недостаточное покрытие территории страны сетью метеорологических радиолокационных станций и аэрологических станций.

## **ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Совершенствование МОП ГА должно идти по нескольким направлениям одновременно:

- совершенствование нормативно-правовой базы МОП ГА;
- разработка и внедрение современных технических средств проведения метеонаблюдений и измерений, существенное улучшение методики и достоверности аэрологических измерений, а также повышение надежности (обязательности) получения аэрологической информации от всех аэрологических станций синоптиками АМСГ и экипажами воздушных судов, диспетчерами УВД. В интересах авиации необходимо качественно повысить достоверность аэрологических измерений за счет разработки и внедрения комплексных систем аэрологического радиозондирования;
- разработка и внедрение систем автоматизированного прогнозирования на основе современных численных методов и методик прогнозирования;
- централизация процессов прогнозирования и обмена метеоинформацией.

Внедрение систем автоматизированного прогнозирования позволит практически без участия метеоролога-синоптика получать детальный метеопрогноз, и снизить тем самым уровень «перестраховочных» прогнозов. Такой подход, широко распространенный в странах ЕС, предполагает, что основу работы метеоролога-синоптика составляют данные моделей и построенные по ним прогностические карты. Квалификация и опыт метеоролога-синоптика играют в данном случае менее заметную роль.

В настоящее время предлагаются (ООО «РМК ТРАСТ») различные варианты модернизации МОП ГА, которые предполагают централизацию процессов прогнозирования и информационного обмена в авиационных метеорологических информационно-телекоммуникационных узлах (АМИТУ) (рис. 6).

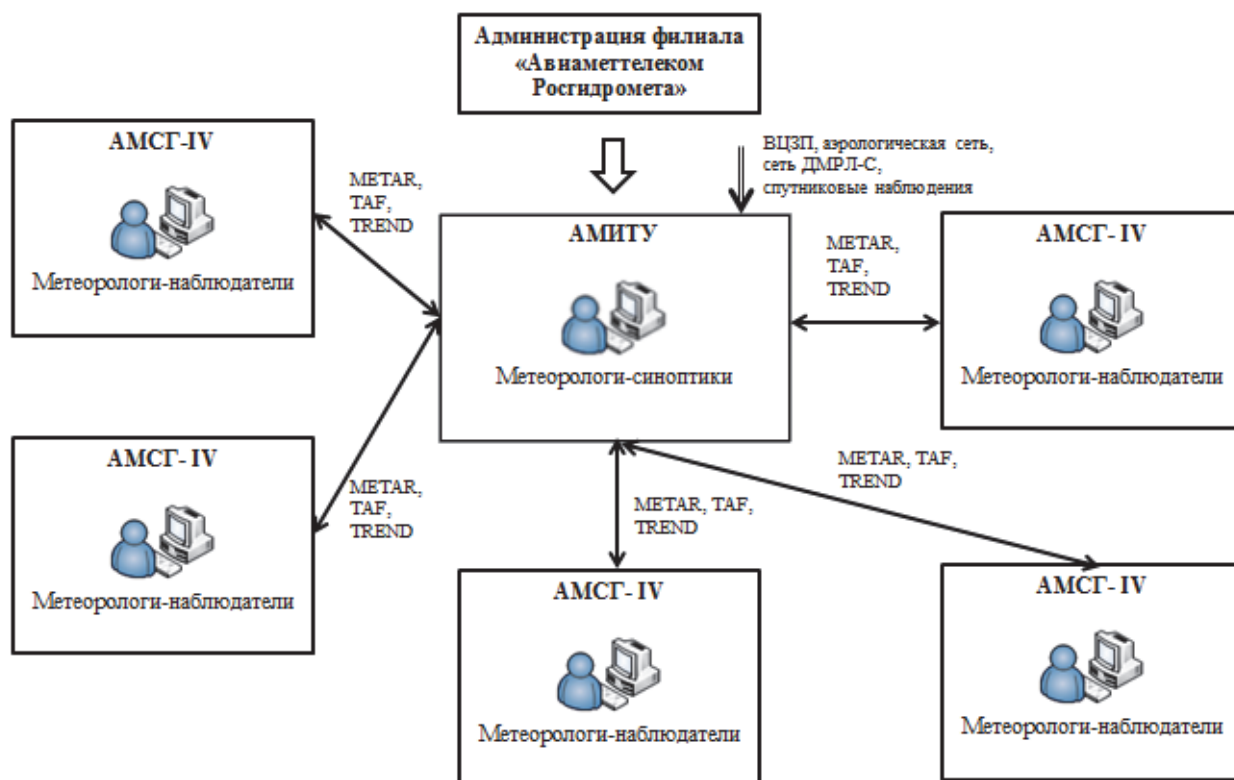


Рис. 6. Перспективная структура аэродромных метеорологических органов в филиале  
Fig. 6. Perspective structure of aerodrome meteorological bodies in the branch

На АМИТУ в каждом филиале ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» возлагаются функции прогнозирования по аэропортам без синоптической группы (АМСГ-IV), а также функции информационного обеспечения и сбора данных в зоне ответственности филиала. При построении такой схемы организации МОП ГА возникают дополнительные задачи:

- синоптическая группа АМИТУ должна отслеживать фактическую погоду на аэродромах в режиме, приближенном к реальному времени, включая информацию близлежащих метеорологических станций Росгидромета и станций сети аэрологического радиозондирования;
- для формирования полноценной сводки METAR и обслуживания потребителей на аэродроме необходима передача из АМИТУ секции TREND наблюдателю;
- повышенная нагрузка на персонал АМИТУ требует максимальной автоматизации рутинных задач, связанных с прогнозированием, контролем своевременности сбора и передачи данных, качества информации, метеорологического обеспечения подразделений.

Для комплексного решения задач информационного обмена в рамках оптимизации МОП ГА ООО «РМК ТРАСТ» на базе ядра ММК «МИТРА R5» разработало специализированную версию ММК «МИТРА-R5-Ц», позволяющую значительно снизить нагрузку на технический персонал АМИТУ и поднять работу на качественно новый технологический уровень. Технологическим ядром АМИТУ является специализированный ММК «МИТРА-R5-Ц» на базе двух и более серверов, резервирующих друг друга и обеспечивающих информационное обеспечение и сбор данных в зоне ответственности филиала с выполнением в режиме реального времени мониторинга полноты, своевременности, достоверности и качества метеорологической информации.

Работы по внедрению перспективных структур (рис. 6) уже начаты. Так, например, созданы укрупненные центры прогнозирования погоды в Елизово, Хабаровске, Красноярске, Пулково, Краснодаре, Ростове-на Дону, а также ведутся работы по созданию таких центров в Москве, Иркутске, Нижнем Новгороде, Ханты-Мансийске. Однако для успешного функционирования этих

центров требуется обеспечить высокую достоверность первичных метеоданных и данных об опасных явлениях погоды как в районе аэродрома, так и на маршрутах полетов ВС. К тому же такая структура (рис. 6) является крайне уязвимой для воздействия информационных атак.

Обеспечение высокой достоверности первичных метеоданных возможно за счет разработки и внедрения современных технических средств метеоизмерений и наблюдений, работающих на разных физических принципах, а также их комплексирования. При этом необходимо учитывать, что в условиях Крайнего Севера и Арктики традиционные средства метеонаблюдений [3, 7] на аэродромах не всегда могут быть экономически выгодными, особенно для аэродромов сезонного режима работы. Для таких аэродромов наиболее приемлемым решением может быть использование аэродромных мобильных комплексов метеолокации и зондирования атмосферы (АМКМ). Примером отечественной разработки АМКМ является мобильный интегрированный метеокомплекс СВАРОГ [8, 9], представляющий собой подвижный метеорологический и радиолокационный информационно-измерительный комплекс, предназначенный для обеспечения метеорологической информацией метеорологических служб и подразделений гражданской авиации, а также других потребителей.

Отказ от шаропилотного зондирования на аэродромах в целях экономии средств и практическое отсутствие средств измерения параметров ветра на высотах полета ВС существенно сказались на качестве прогнозов. Альтернативой шаропилотному зондированию является использование технических средств для измерения параметров ветра на высотах полета ВС, реализованных на принципах дистанционных или контактных измерений. Наибольшего выигрыша можно достичь за счет использования беспилотных метеоразведчиков (БМР) самолетного, вертолетного или орнитоптерного типа. Каждый из указанных типов БМР имеет свои недостатки и преимущества. Вопрос о выборе типа БМР должен учитывать ряд важных моментов, а именно:

- компоновка БМР должна осуществляться таким образом, чтобы на измерения, производимые датчиками, не оказывали или оказывали минимальное влияние конструкция БМР, работа двигателей, вращающиеся винты и т. д.;
- тип БМР должен быть выбран из условия минимизации вероятности его потери при неблагоприятных условиях в атмосфере, которые вызваны сильными турбулентностями и порывами ветра.

Необходимо отметить, что разработки БМР были предприняты в ЦАО Росгидромета в начале 2000-х годов. Однако эти разработки оказались невостребованными и касались только сверхлегких БМР. С другой стороны, практика МОП ГА показывает, что БМР могут стать дополнительным надежным средством получения информации о профилях температуры, ветра и влажности в районе аэродрома до высот порядка 1–3 км. Кроме этого, БМР может быть средством верификации для дистанционных систем определения профиля температуры и влажности, метеорологических РЛС ближней аэродромной зоны.

Детального рассмотрения требует задача модернизации аэрологической сети Росгидромета. В настоящее время со стороны ГА не предъявляются требования к качеству аэрологических измерений. Однако аэрологические данные являются по сути единственной информацией о состоянии атмосферы на маршрутах полетов ВС. Сейчас на сети используются устаревшие типы аэрологических радиолокаторов АВК-1М, МАРЛ-А(Т). Проходят испытания современной системы аэрологического зондирования ПОЛЮС, основанной на навигационном способе сопровождения радиозонда. Система ПОЛЮС использует сигналы ГЛОНАСС и GPS, а в перспективе будет использовать и сигналы СНС Galileo. Вместе с тем система ПОЛЮС обладает рядом существенных недостатков [10], которые, несмотря на явные достоинства системы, затрудняют ее практическое использование.

Выходом из сложившейся на аэрологической сети ситуации может стать внедрение комплексных систем радиозондирования с соответствующими существенными изменениями методики обработки результатов зондирования, которые позволят уменьшить вероятность срыва при

слежении за радиозондом в атмосфере, обеспечить помехоустойчивость системы при ее работе в условиях сложной помеховой обстановки и при малых отношениях сигнал/шум на входах приемных устройств станции слежения, обеспечить требуемую точность определения пространственных координат радиозонда, сократить время поиска сигналов радиозонда, а также повысить достоверность получаемой метеоинформации (профиля температуры, влажности и ветра).

Таким образом, совершенствование МОП ГА должно проводиться за счет:

- аэродромных площадок;
- разработки и внедрения метеорадиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны и лидарных систем;
- расширения и совершенствования аэрологической сети путем комплексирования информации от радиолокационных и радионавигационных систем радиозондирования атмосферы и усовершенствования методики обработки данных радиозондирования.
- разработки новых средств проведения метеонаблюдений, включая использование технологий БМР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены в основном технические аспекты проблемы МОП ГА. Немаловажной является проблема оценки качества МОП, и в частности проблема оценки оправдываемости авиационных метеопрогнозов. Оправдываемость метеопрогнозов – это установление степени соответствия условий погоды, которые прогнозировались, тем условиям, которые фактически наблюдались. Исходя из этого, оценке подлежат все составляемые АМСГ прогнозы. Оценка оправдываемости метеопрогнозов проводится ежедневно на АМСГ, однако следует отметить, что если нарушений в работе АМСГ не было и не возникало ситуаций, когда эксплуатанты и службы УВД аэродрома предъявляли претензии к качеству метеопрогнозов, то оценка оправдываемости метеопрогнозов, по сути, внутреннее дело АМСГ. В случае если в период действия метеопрогнозов произошли нарушения регулярности (например, отмены и задержки рейсов), связанные с метеорологическими условиями, или произошло происшествие, повлиявшее на безопасность полетов, оценка оправдываемости метеопрогнозов проводится на АМСГ совместно с представителями служб УВД и эксплуатанта. Анализируя существующую методику оценки оправдываемости метеопрогнозов, можно сделать вывод, что получаемая оценка оправдываемости метеопрогнозов 95,2 % является явно завышенной [8], а реальная оценка оправдываемости метеопрогнозов остается «в недрах» АМСГ (АМЦ). Это подтверждают результаты анкетирования летных экипажей: оправдываемость 80 % отмечают 95 % опрошенных в целом по гражданской авиации и 91 % в крупных аэропортах.

Таким образом, проблема МОП ГА на сегодняшний день многогранна, ее успешное решение требует глубокого анализа всей структуры МОП ГА и формулировки первостепенных, в целом взаимосвязанных между собой, задач, требующих решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богаткин О.Г. Авиационные прогнозы погоды. 2-е изд., стереотип. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 288 с.
2. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метеорологические аспекты разработки и использования радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2004. 590 с.
3. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.
4. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.

5. Пьянков В.С. Экстремальные особенности метеообеспечения полетов в субарктическом и арктическом регионе России // Авиапанорама. 2016. № 5(119). С. 74–76.
6. Черная О.О. Авиаметеообеспечение и право: монография. М.: Дашков и К°, 2016. 336 с.
7. Селезнев В.П. Метеорологическое обеспечение полетов. М.: ЛИБРОКОМ, 2018. 190 с.
8. Болелов Э.А. Комплексная обработка метеоинформации в аэродромных мобильных комплексах метеолокации и зондирования атмосферы / Ю.Н. Кораблев, Н.А. Баранов, С.С. Демин, А.А. Ещенко // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20(331). С. 82–92.
9. Галаева К.И. Обоснование задач, решаемых метеорологическим радиолокационным комплексом ближней аэродромной зоны / Э.А. Болелов, И.Б. Губерман, А.А. Ещенко, С.В. Далецкий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20(331). С. 74–81.
10. Болелов Э.А., Ермошенко Ю.М., Фридзон М.Б. Повышение надежности системы радиозондирования атмосферы за счет комплексирования методов сопровождения радиозонда в полете // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 114–119.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Болелов Эдуард Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, e.bolelov@mstuca.aero.

## METEOROLOGICAL SERVICE FOR CIVIL AVIATION: PROBLEMS AND WAYS OF THEIR SOLUTION

**Eduard A. Bolelov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

Meteorological support of flights (MSF) of civil aviation (CA) is one of the types of support of flights and is carried out in order to ensure the safety, regularity and efficiency of flights by providing the required meteorological information to users of airspace, bodies engaged in air traffic management. The international and national regulation of the MSF CA is based on the recommendations of the World Meteorological Organization (WMO) and ICAO as well as the Federal Aviation Regulations and other regulatory and guidance documents. In the Russian Federation the MSF CA is performed by "Aviamettelekom of Roshydromet", which is a regional organization with a regional-distributed network of structural units including a head office and 15 branches. Aerodrome meteorological authorities conduct the direct meteorological support. At present, there are a number of problems in the MSF CA, that is availability of the regulatory acts and rules allowing the use by aviation consumers of meteorological information supplied outside the officially authorized providers of meteorological information; insufficient technical provision with modern meteorological equipment of aerodrome meteorological authorities; obsolescence of existing technical means to carry out meteorological observations and supply meteorological information; lack of qualified meteorologists; divisions redundancy of "Aviamettelekom of Roshydromet"; in a number of regions of the Russian Federation there is a lack of reliable methods for weather forecasts and hazardous weather phenomena for aviation; insufficient coverage of the country's territory with a network of meteorological radar and aerological stations. The main ways of improving the MSF CA must be guided in several directions simultaneously: improvement of the legislative and regulatory frameworks of the MSF CA; the development and introduction of modern technical means for carrying out meteorological observations and measurements; development and implementation of computer-aided forecasting on the basis of modern numerical methods and prediction techniques; the centralization of the forecasting processes and sharing weather data.

**Key words:** aviation weather forecast, meteorological support of flights, aerodrome meteorological authority, provider of meteorological information, meteorological report, unmanned weather reconnaissance, dangerous meteorological phenomena.

## REFERENCES

1. **Bogatkin, O.G.** (2010). *Aviatsionnye prognozy pogody* [Aviation weather forecasts]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 288 p. (in Russian)
2. **Ivanov, V.E., Fridzon, M.B. and Essack, S.P.** (2004). *Radiozondirovanie atmosfery. Tekhnicheskie i metrologicheskie aspekty razrabotki i ispolzovaniya radiozondovykh izmeritelnykh sredstv* [Sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring means]. Ekaterinburg: NISO UrO RAN, 590 p. (in Russian)
3. **Bogatkin, O.G.** (2009). *Osnovy aviatsionnoy meteorologii* [Fundamentals of aviation meteorology]. St. Petersburg: RGGMU, 339 p. (in Russian)
4. **Bogatkin, O.G. and Enikeeva, V.D.** (1992). *Analiz i prognoz pogody dlya aviatsii* [Analysis and weather forecast for aviation]. 2nd ed., Leningrad: Hydrometeoizdat, 272 p. (in Russian)
5. **Pyankov, V.S.** (2016). *Ekstremalnye osobennosti meteooobespecheniya poletov v subarkticheskom i arkticheskom regione Rossii* [Characteristics of Extreme meteorological support of flights in the subarctic and Arctic region of Russia]. *Aviapanorama*, vol. 5, no. 119, pp. 74–76. (in Russian)
6. **Chernaya, O.O.** (2016). *Aviameteooobespechenie i pravo* [Supply of meteorological data and law]. Monograph. Moscow: Dashkov and K<sup>o</sup>, 336 p. (in Russian)
7. **Seleznev, V.P.** (2018). *Meteorologicheskoe obespechenie poletov* [Meteorological support of flights]. Moscow: LIBROKOM, 190 p. (in Russian)
8. **Bolelov, E.A., Korablev, Yu.N., Baranov, N.A., Demin, S.S. and Eshchenko, A.A.** (2018). *Kompleksnaya obrabotka meteoinformatsii v aerodromnykh mobilnykh kompleksakh meteorologicheskoy i zondirovaniya atmosfery* [Complex processing of meteorological data in mobile airfield complexes of meteorological and sounding of the atmosphere]. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, vol. 20, no. 331, pp. 82–92. (in Russian)
9. **Galaeva, K.I., Bolelov, E.A., Guberman, I.B., Eshchenko, A.A. and Daleckiy, S.V.** (2018). *Obosnovanie zadach, reshaemykh meteorologicheskimi radiolokatsionnymi kompleksami blizhney aerodromnoy zony* [Substantiation of the tasks of the meteorological radar system near the airfield area]. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, vol. 331, no. 20, pp. 74–81. (in Russian)
10. **Bolelov, E.A., Ermoshenko, Yu.M. and Fridzon, M.B.** (2015). *Povyshenie nadezhnosti sistemy radiozondirovaniya atmosfery za schet kompleksirovaniya metodov soprovozhdeniya radiozonda v polete* [Improving the reliability of the atmosphere radiosonde system by integrating the methods of radiosonde tracking in flight]. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 222, pp. 114–119. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Eduard A. Bolelov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Air Transport Radio-Electronic Equipment Maintenance Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, edbolelov@mail.ru.

Поступила в редакцию 16.06.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 16.06.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 551.501.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-130-136

## ПРИМЕНИМОСТЬ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

А.Г. ГОРЕЛИК<sup>1</sup>, С.Ф. КОЛОМИЕЦ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup>Фрязинский филиал института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия

В статье рассматривается возможность оценки скорости движения хаотических сред с использованием информации из «узких» спектральных интервалов стационарных случайных сигналов, генерируемых движением таких сред на датчиках, расположенных в двух точках вдоль направления движения среды. Вопрос о физическом смысле минимального спектрального интервала, необходимого для таких измерений с заданной точностью, обсуждается на основе соотношений, приводимых в статье и сформулированных с использованием теории однородной изотропной турбулентности. Показано, что в рамках предложенных соотношений процесс фильтрации может быть описан с использованием турбулентного члена. Поэтому результаты фильтрации можно рассматривать как виртуальную турбулентную диссипацию. Последнее позволило полуколичественно описать результаты численных расчетов, представленных в статье, и сформулировать пути дальнейшего развития предложенного подхода, который после соответствующих усовершенствований можно было бы назвать «полным корреляционным анализом с фильтрацией» (FFCA). В качестве направлений такого развития обсуждается метод измерения скорости турбулентной диссипации посредством использования двух (или более) фильтров с различными полосами пропускания, применяемых к сигналам в двух точках измерений взаимной корреляции, а также оценка оптимального числа фурье-гармоник в представлении сигнала, прошедшего фильтр, и оценка формы спектра турбулентности. Помимо этого, с использованием соотношений, приведенных в статье, известен факт о том, что доплеровские измерения не применимы к дистанционному зондированию с использованием широкополосных сигналов в качестве носителя информации, а также причина, по которой такие измерения применимы в случае сигналов с узкими спектрами, получают более ясное физическое объяснение. Последнее позволяет с точки зрения кросс-корреляционного анализа определить монохроматический сигнал как таковой.

**Ключевые слова:** теория однородной изотропной турбулентности, измерения в хаотических средах, спектр случайного стационарного процесса.

### ВВЕДЕНИЕ

Спустя десятилетия после известного замечания Р. Фейнмана турбулентность все так же остается «величайшей из нерешенных проблем классической физики». Мы не в состоянии прогнозировать простейшие турбулентные потоки, не обращаясь к экспериментальным данным о самом потоке.

Одна из наиболее распространенных на сегодняшний день феноменологических моделей турбулентного движения – это «гипотеза К-41». Она представляет поток состоящим из отдельных, больших и малых объемов согласованно движущихся частиц материи – вихрей или порывов. Считается, что последние случайно возникают на левой границе инерционного интервала, в результате гидродинамической неустойчивости основного течения, затем самостоятельно хаотически движутся некоторое время и, в конце концов, диссипируют, давая внутри инерционного интервала начало новым вихрям, или преобразуются в тепло вблизи масштаба Колмогорова. В соответствии с этой гипотезой частоты в спектре мощности турбулентных пульсаций могут быть сопоставлены с пространственной частотой турбулентных вихрей (порывов) и, соответственно, с их пространственным масштабом и скоростью перемещения в пространстве.

Но К-41 не является единственной. Хинце определяет турбулентное движение как «состояние потока, при котором характеризующие его величины испытывают случайные измерения во времени и в пространстве, такие, что можно найти их статистические типичные сред-

ние» [1]. Хргиан, ссылаясь на [2], указывает на более общее представление турбулентности как непрерывного спектра периодических движений со случайно распределенными фазами [3].

Несмотря на то, что имеющиеся представления о турбулентности подразумевают возможность изучения ее динамики с использованием абстракции отдельных вихрей (порывов), подавляющее большинство прикладных задач решается в рамках математического аппарата случайных процессов с независимыми приращениями и корреляционной теории. Описание вихревой структуры потока подобными средствами невозможно. В настоящее время параметры вихрей, иногда возникающие в приложениях, обычно представляются усредненными по всему потоку (рабочему объему измерительного инструмента) в целом и не имеют прямых способов измерения [4].

Очередной рост интереса к вихревому представлению турбулентного движения поддерживается интенсивным развитием вычислительной гидродинамики, которая требует соответствующих средств и экспериментального изучения потоков [5, 6]. Таким образом, экспериментальное изучение и дальнейшее уточнение вихревых абстракций турбулентного движения имеет не только теоретическое, но и прикладное значение.

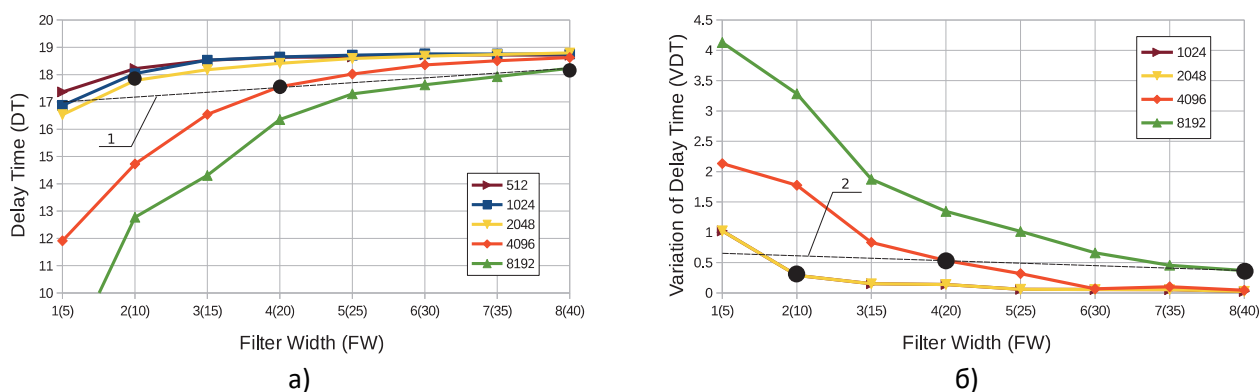
### ФАЗОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ПОРОЖДАЕМЫХ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

В интерферометрах оценка абсолютной разницы фаз позволяет измерять перемещения в пределах  $\lambda$ . Доплеровские измерения скорости требуют производной той же величины по времени. Но при оценке скорости турбулентного потока, порождающего на датчиках сигналы с широким спектром, доплеровская обработка не применяется, хотя в отношении гармоник фурье-спектра она математически допустима. Вместо нее используются дисперсионные методы (ДМ) или оценки группового времени задержки (ГВЗ). Последние, таким образом, могут рассматриваться как широкополосные аналоги доплеровской обработки [7, 8]. Но с их использованием поток описывается лишь в терминах одного скалярного параметра, что является большим недостатком при наличии развитой динамической структуры. Подобное снижение измерительных возможностей рассматривается как следствие использования широкополосных сигналов. Помимо этого, точность кросс-корреляционных оценок сильно зависит от уровня шума, а его фильтрация искажает сами оценки. На малых временах запаздывания относительная ошибка может составлять десятки процентов, что аналогично проблеме доплеровских измерений в области нуля.

В общем случае характер усреднения зависит от конкретной структуры потока и интенсивности взаимодействия отдельных ее составляющих с зондирующим излучением. Поэтому представляется очевидным, что даже в рамках двухкомпонентной модели «перемежающихся» потоков аналитическая ценность информации, получаемой с использованием ГВЗ или ДМ, невысока и важность разработки методов более тонкой оценки структуры среды не вызывает сомнений.

Классическую методику оценки ГВЗ можно усовершенствовать, добавив полосовую фильтрацию с оценкой времени задержки в пределах полос. В этом случае поток можно охарактеризовать более чем одним скалярным параметром, подобно доплеровскому спектру скоростей. Теоретически с ростом количества фильтров такая обработка сводится к оценке разности фаз соответствующих гармонических составляющих двух спектров флуктуаций, то есть к доплеровской обработке. Последняя, как уже было отмечено, не применяется, хотя математически допустима. Практически увеличение количества фильтров поднимает вопросы о минимально допустимой ширине полосы фильтрации и влиянии динамики самой среды на формируемые оценки.

Зависимости, приведенные на рис. 1, были получены в результате численного моделирования прямой задачи с использованием белого и окрашенных (коррелированных) шумов. В качестве модели сигнала в первой точке рассчитывалась реализация белого шума, в которой затем нужное значение корреляции достигалось с использованием алгоритма скользящего среднего. Ее копия, сдвинутая на некоторое количество дискретных отсчетов, использовалась в качестве сигнала во второй точке. После идентичной для обоих сигналов частотной фильтрации восстанавливалось временное представ-



**Рис. 1.** Оценки ГВЗ по узкополосным выборкам из широкополосных сигналов: *a* – смещение; *б* – дисперсия; 1, 2 – линии фильтров равной ширины, но с разным количеством гармоник в полосе пропускания.

В скобках по оси ОХ после порядкового номера указана ширина фильтра в частотных отсчетах

**Fig. 1.** Group delay time calculated after a narrow filtration of a wide band signal: *a* – bias; *б* – dispersion; 1, 2 – lines stand for filters of equal width but different Fourier expansion terms in the passband.

Numbers in parentheses under OX axis stand for a filter width in discrete counts corresponding to DFFT sample size

ление сигналов внутри полос фильтрации, которое использовалось затем для расчета ГВЗ. Для простоты во временной и спектральной области использовались прямоугольные окна.

Из рис. 1, *a* видно, что оценки априорно задаваемого времени задержки, полученные по узким спектральным выборкам, имеют статистический разброс и смещены к нулю. Смещение и его дисперсия растут при уменьшении полосы фильтрации. Данные на рисунке соответствуют сигналу, который был получен расчетом скользящего среднего с окном 40 отсчетов с последующим сдвигом на 19 отсчетов. Аналогичные зависимости наблюдаются на разных периодах корреляции, включая белый шум, и при разных величинах смещений.

Несмотря на то, что анализ смещения максимума кросс-корреляция является достаточно общим методом оценки динамики хаотических сред, сдвиги времени задержки, вызванные особенностями самих сред, получили детальное рассмотрение относительно недавно [9–11]. Для объяснения полученных результатов представим нормированную автокорреляционную функцию сигнала  $c_{11}(\tau)$ , которую априорно будем считать гауссовой. Предполагая затем, что турбулентные пульсации имеют гауссов спектр с дисперсией  $2\sigma_i^2$  и одинаково сказываются на всех частотах исходного сигнала, можно полагать, что спектр после воздействия турбулентности представляется сверткой спектров сигнала и турбулентности. Последняя соответствует умножению корреляционных функций. Имеем

$$|c_{11}^T(\tau)| = K_0 \exp[-(v_o \tau)^2 - 2(\sigma_i \tau)^2], \quad (1)$$

соответствующий спектр мощности будет

$$P_{11}^T(\omega) = M_0 \exp\left[-\frac{\omega^2}{2(v_o^2 + 2\sigma_i^2)}\right].$$

Так же должен выглядеть взаимный энергетический спектр, который является произведением комплексно-сопряженных спектров Фурье. Можно принять, что последние отличаются лишь на множитель сдвига при условии, что сдвиг составляет малую часть временного интервала спектрального оценивания:

$$E_{12}(\omega) = F_1(\omega)F_2^*(\omega)e^{-i\omega\theta}.$$

В этом случае кросс-корреляционная функция по определению будет

$$C_{12}^T(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{\omega^2}{2(v_o^2 + 2\sigma_t^2)} \right] e^{i\omega(\tau - t_o)} d\omega,$$

и

$$|C_{12}^T(\tau)| = K_1 \exp \left[ -\frac{1}{2}(v_o^2 + 2\sigma_t^2)(\tau - t_o)^2 \right]. \quad (2)$$

Аналогично спектр и кросс-корреляции без учета турбулентности будут

$$P_{11}(\omega) = M_1 \exp \left[ -\frac{\omega^2}{2v_o^2} \right], \quad |C_{12}(\tau)| = K_2 \exp \left[ -v_o^2(\tau - t_o)^2 \right].$$

Если учитывать воздействие турбулентности не сразу, а после сдвига исходного сигнала, то

$$|c_{12}(\tau)| = \exp \left[ -(v_o\tau - v_ot_o)^2 - 2(\sigma_t\tau)^2 \right], \quad (3)$$

где  $t_o$  – априорный (фактический) сдвиг для процесса без относительного изменения между точками расчета кросс-корреляции,  $\sigma_t$  – среднеквадратичное отклонение спектра турбулентных пульсаций,  $v_o$  – удвоенное среднеквадратичное отклонение спектра исходного сигнала.

Выражение (3) отличается от (2), что указывает на необходимость в общем случае учитывать пространственный характер структурной функции турбулентности. Выражение (3) подразумевает некоррелированные турбулентные пульсации. Учет пространственных корреляций турбулентности, требуемый для придания физического смысла (2), выходит далеко за рамки настоящей статьи. Дополняя в (3) показатель до полного квадрата разности, после соответствующей группировки можно получить

$$|c_{12}(\tau)| = \exp \left[ -\eta - \frac{(\tau - \tau_p)^2}{2\tau_c^2} \right], \quad (4)$$

где  $\eta = \frac{2v_o^2\sigma_t^2}{v_o^2 + 2\sigma_t^2} t_o^2$  – декорреляционный параметр, уменьшающий пик кросс-корреляции,

$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{2(v_o^2 + 2\sigma_t^2)}}$  – среднеквадратичное отклонение (ширина) кросс-корреляции,

$\tau_p = \frac{v_o^2}{(v_o^2 + 2\sigma_t^2)} t_o \sim \frac{v_o^2}{(v_o^2 + k\varepsilon^{2/3})} t_o$  – наблюдаемая задержка,  $k$  – некоторый коэффициент.

Из приведенных соотношений видно, что наличие турбулентности смещает пик кросс-корреляционной функции к нулю. В рассматриваемых результатах моделирование турбулентности не проводилось, но за счет частотной фильтрации пик кросс-корреляции также смещался к нулю. Учитывая связь  $\tau_p$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$ , приведенную выше, можно заключить в общем случае, что статистическое смещение оценок определяется уменьшением энергии связи сигналов, независимо от того, каким именно образом это уменьшение

происходит. В частности, фильтрация действует аналогично турбулентной диссипации, сдвигая максимум кросс-корреляции к нулю.

В случае простого запаздывания сигнала без его относительного изменения дисперсия определяется статистическими свойствами сигнала, режимом дискретизации и временем его наблюдения  $T_0$ , а дополнительных смещений не возникает. Простое запаздывание является идеальным случаем и основой сравнительных оценок. Относительное изменение сигнала в точках регистрации означает наличие турбулентной составляющей в исходном сигнале, которую необходимо учитывать до проведения фильтрации. В этом случае сдвиги времени запаздывания, которые могут быть экспериментально получены с использованием двух (и более) фильтров разной ширины, открывают возможность оценки самой турбулентной составляющей в дополнение к известным подходам [12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена математическая модель смещений статистических оценок ГВЗ по узкополосным выборкам широкополосных сигналов, формируемых турбулентностью. С ее использованием появляется возможность увязать  $T_0$  – время наблюдения процесса с некоторой шириной спектра на заданном пространственном масштабе  $x$  (аналог среднего времени задержки  $t_0$ ) и минимальную ширину фильтра  $\Delta f$ , вносящего заданное статистическое смещение, не превосходящее некоторой величины (например, не более  $0,5t_0$ ), и обеспечивающего заданную дисперсию оценок. Подобное соотношение является условием наблюдаемости турбулентного вихря, задаваемого  $\Delta f$ , на пространственно-временных масштабах  $T_0$ ,  $x$ .

Интересно отметить, что сигналы с малым  $\nu_0$  в рамках рассматриваемой модели характеризуются предельно большими смещениями задержки, в пределе – возможность ее оценки пропадает. В отношении таких сигналов вместо ГВЗ, которое теряет физический смысл, используется разница фаз монохроматического колебания. Иными словами, при наличии априорной информации о спектре исходного сигнала и только в рамках некоторой модели процесса фазовые измерения приобретают физический смысл. В случае фильтрации широкополосного сигнала растет турбулентная составляющая  $\sigma_t$ . Ее выражение через диссипацию позволяет предполагать, что для предельно больших значений  $\sigma_t$  связь между сигналами в точках пропадает, что является качественным объяснением причины неинформативности доплеровских измерений с использованием гармоник фурье-разложения широкополосного сигнала, несмотря на их допустимость в математическом смысле. Экспериментальная и численная проверка этого положения представляет большой интерес, так как оно представляет возможность физически ясного рассмотрения вопроса об оптимальном количестве гармоник фурье-разложения сигнала в полосе пропускания фильтра, который логически следует из неинформативности доплеровских измерений в широкополосных сигналах.

Обращает на себя внимание то, что линии фильтров равной ширины на рис. 1 имеют ненулевой наклон, в то время как рассматриваемая модель с гауссовыми спектрами и корреляциями такого наклона не содержит. Это указывает на неравные значения энергии связи при учете различного количества гармоник фурье-разложения сигнала в неизменной полосе пропускания и может быть связано с негауссовостью спектра флуктуаций, формируемого операцией скользящего среднего.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хинце И. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
2. Хргиан А.Г. Физика атмосферы. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 307 с.
3. Ламли Д.Л., Пановски Г.А. Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.

4. **Doviak R.J., Lataitis R. J., Holloway C.L.** Cross-correlation and cross-spectra for spaced-antenna wind profilers. Part I: Theoretical Analysis // *Radio Science*. 31(1). Pp. 157–180.
5. **Zhiyin Y.** Large-eddy simulation: Past, present and the future // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. Vol. 28, № 1. Pp. 11–24.
6. **Lesieur M., Metais O.** New trends in large eddy simulations of turbulence // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1996. Vol. 28(1). Pp. 45–82.
7. **Olyak M.R.** The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. Vol. 102. Pp. 185–191.
8. **Farley D.T., Ierikic H.M., Fejer B.G.** Radar interferometry: A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1981. Vol. 86, № A3. Pp. 1467–1472.
9. **Holdsworth D.A., Reid I.M.** An investigation of biases in the full correlation analysis technique // *Advances in Space Research*. 1997. Vol. 20, № 6. Pp. 1269–1272.
10. **Holdsworth D.A.** An investigation of biases in the full spectral analysis technique // *Radio Science*. 1997. Vol. 32, № 2. Pp. 769–782.
11. **Olden J.D., Neff B.D.** Cross-correlation bias in lag analysis of aquatic time series // *Marine Biology*. 2001. Vol. 138, № 5. Pp. 1063–1070.
12. **Holloway C.L.** Cross correlations and cross spectra for spaced antenna wind profilers 2. Algorithms to estimate wind and turbulence // *Radio Science*. 1997. Vol. 32, № 3. Pp. 967–982.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горелик Андрей Габриэлович**, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, [radiometeo@mail.ru](mailto:radiometeo@mail.ru).

**Коломиец Сергей Федорович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, [radiometeo@mail.ru](mailto:radiometeo@mail.ru).

### A VALIDITY OF PHENOMENOLOGICAL MODELS OF TURBULENCE IN EXPERIMENTAL STUDIES

**Andrey G. Gorelik<sup>1</sup>, Sergey F. Kolomiets<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Kotelnikov Institute of Radio-engineering and Electronics,  
Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia*

#### ABSTRACT

Estimates of the velocity of the chaotic medium motion using information of "narrow" spectral intervals of stationary random signals generated by the motion of such media on the sensors located at two points along the direction of medium motion are considered. The question about the physical meaning of the minimum spectral interval required for such measurements with a given accuracy is posed and discussed based on the main relations given in the article and formulated using the theory of homogeneous isotropic turbulence. It is shown, that within suggested relations the process of filtration may be described using a turbulent term and so the results of the filtration could be seen as a virtual turbulent dissipation. The latter allowed semi-quantitatively describing the results of the numeric calculations presented in the article and forming the ways of the further development of the approach suggested which after appropriate updating might be called a "full filtered correlation analysis" (FFCA). In particular, a method of turbulent dissipation rate measurement by means of two (or more) filters with different band-passes applied to signals in two points of cross-correlation measurements and an approach to the physically clear description of the optimal number of Fourier-terms in the representation of the signal passed the filter are outlined as well as the approach to a

turbulence spectral shape evaluation. Apart from that, with the relations given in the article, the well-known fact that Doppler measurements are not applicable to the remote sensing with use of wideband signals as an information carrier as well as the reason why such measurements are applicable in the case of signals with narrow spectra receive its clear physical explanation. The latter allows forming the definition of a monochromatic signal as it is from the point of view of a cross-correlation analysis.

**Key words:** homogeneous isotropic turbulence theory, measurements in chaotic media, spectrum of stationary random process.

## REFERENCES

1. **Khince, I.** (1963). *Turbulentnost, ee mekhanizm i teoriya* [Turbulence, its mechanism and theory]. Moscow: Fizmatgiz, 680 p. (in Russian)
2. **Khrgian, A.G.** (1978). *Fizika atmosfery* [Physics of the Atmosphere], vol. 2. Leningrad: Gidrometeoizdat, 307 p. (in Russian)
3. **Lamli, Dg.L. and Panovski, G.A.** (1966). *Struktura atmosfernoy turbulentnosti* [Structure of atmospheric turbulence]. Moscow: Mir, 264 p. (in Russian)
4. **Doviak, R.J., Lataitis, R.J. and Holloway, C.L.** (1996). *Cross-correlation and cross-spectra for spaced-antenna wind profilers*. Part I: Theoretical Analysis. *Radio Science*, 31(1), pp. 157–180.
5. **Zhiyin, Y.** (2015). *Large-eddy simulation: Past, present and the future*. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 28, no. 1, pp. 11–24.
6. **Lesieur, M. and Metais, O.** (1996). *New trends in large eddy simulations of turbulence*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 28(1), pp. 45–82.
7. **Olyak, M.R.** (2013). *The dispersion analysis of drift velocity in the study of solar wind flows*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 102, pp. 185–191.
8. **Farley, D.T., Ierik, H.M. and Fejer, B.G.** (1981). *Radar interferometry: A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere*. *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, no. A3, pp. 1467–1472.
9. **Holdsworth, D.A. and Reid, I.M.** (1997). *An investigation of biases in the full correlation analysis technique*. *Advances in Space Research*, vol. 20, no. 6, pp. 1269–1272.
10. **Holdsworth, D.A.** (1997). *An investigation of biases in the full spectral analysis technique*. *Radio Science*, vol. 32, no. 2, pp. 769–782.
11. **Olden, J.D. and Neff B.D.** (2001). *Cross-correlation bias in lag analysis of aquatic time series*. *Marine Biology*, vol. 138, no. 5, pp. 1063–1070.
12. **Holloway, C.L.** (1997). *Cross correlations and cross spectra for spaced antenna wind profilers 2. Algorithms to estimate wind and turbulence*. *Radio Science*, vol. 32, no. 3, pp. 967–982.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey G. Gorelik**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Moscow Institute of Physics and Technology, radiometeo@mail.ru.

**Sergey F. Kolomiets**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of Kotelnikov Institute of Radio-engineering and Electronics, radiometeo@mail.ru.

Поступила в редакцию 12.07.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 12.07.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

УДК 551.:629.130

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-137-149

## ОПЕРАТИВНОЕ ИНФОРМИРОВАНИЕ ЭКИПАЖЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ОБ ОПАСНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЯХ В РАЙОНАХ АРКТИЧЕСКИХ ПОСАДОЧНЫХ ПЛОЩАДОК

Ю.Н. КОРАБЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Концерн «Международные аэронавигационные системы», г. Москва, Россия

Метеорологическое обеспечение авиации является необходимым элементом комплексной системы организации воздушного движения, т. к. неверная метеорологическая информация об опасных метеоявлениях оказывает значительное влияние на уровень безопасности полетов и на все аспекты деятельности управления воздушным движением. В настоящее время в России на государственном уровне принят ряд решений, в соответствии с которыми осуществляется широкомасштабная программа по развитию инфраструктуры районов Крайнего Севера и Арктики, освоению территорий, побережья Северного морского пути, разработке месторождений полезных ископаемых. Климат Арктики – один из самых суровых на Земле. Неустойчивость метеорологической обстановки выражается в резком изменении направления и скорости ветра, понижении высоты облачности, быстром натекании тумана с моря на побережье. Сильные ветры вызывают снежную пургу и поземку, летом под влиянием мощного циклона возможно резкое повышение температуры воздуха. Эти природные факторы в своей совокупности создают сложные, порой экстремальные климатические условия, которые приводят к возникновению опасных для авиации метеорологических явлений. Эти явления носят труднопрогнозируемый и значительный по силе воздействия характер. Выполнение взлетно-посадочных операций в Арктике, как правило, связано с повышенным риском. Это обуславливается тем, что временные аэродромы и посадочные площадки имеют минимальную оснащенность в плане аэродромного оборудования, на них почти или полностью отсутствует метеорологическое обеспечение, нет статистических данных об особенностях погоды в месте совершения взлета и посадки. Проблема обслуживания посадочных площадок заключается в использовании устаревшего оборудования, нехватке или невозможности постоянного проживания в районе площадки обслуживающего персонала. Учитывая изложенные выше факты, для эффективного и безопасного использования авиации в Арктическом регионе необходимо максимально автоматизировать процессы получения, обработки и доведения до экипажей данных о метеорологической обстановке в районе посадочной площадки и на маршруте полета. В статье рассматривается необходимость использования автоматизированных систем сбора, обработки и передачи метеоинформации для информирования экипажей воздушных судов, осуществляющих взлетно-посадочные операции в районах самолетных и вертолетных посадочных площадок Арктической зоны, о состоянии приземного слоя атмосферы и высотах, на которых возможно обледенение.

**Ключевые слова:** опасные метеорологические явления, зондирование атмосферы, измеритель профиля температуры, метеостанция, посадочные площадки, обледенение, информационное обслуживание в полете.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России на государственном уровне принят ряд решений, в соответствии с которыми осуществляется широкомасштабная программа по развитию инфраструктуры районов Крайнего Севера и Арктики, освоению территорий, побережья Северного морского пути, разработке месторождений полезных ископаемых. В 2013 году Президентом Российской Федерации утверждена «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года»<sup>1</sup>. Одним из приоритетных направлений этой стратегии является комплексное социально-экономическое развитие региона.

Однако суровые климатические условия Арктики в значительной мере препятствуют созданию там инфраструктуры и освоению обнаруженных больших запасов минеральных ресур-

<sup>1</sup> Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года: утв. Президентом Российской Федерации 13.02.2013 г.

сов Арктики. В условиях низкой плотности автомобильных и железных дорог особенно важно поддерживать и развивать наземную инфраструктуру воздушного транспорта, прежде всего для обеспечения мобильности постоянно проживающего населения, а также трудовых ресурсов, которые работают в основном вахтовым методом.

В Государственном реестре гражданских аэродромов по состоянию на 2018 год на территории Арктической зоны Российской Федерации зарегистрировано 73 аэродрома. Из них только 27 имеют искусственное покрытие, остальные являются грунтовыми аэродромами<sup>2</sup>. Основным видом транспорта, обеспечивающим доставку продовольствия, грузов, почты и людей от узловых аэропортов в труднодоступные, осваиваемые районы является региональная авиация: вертолеты, малые и средние самолеты. При освоении новых месторождений, закладке новых населенных пунктов, а также военных баз на начальном этапе их строительства создаются новые самолетные и вертолетные посадочные площадки. На территории Арктической зоны Российской Федерации находятся 266 посадочных площадок<sup>3</sup>, в том числе:

- посадочных площадок для самолетов – 44;
- посадочных площадок для вертолетов – 222.

В пределах Арктической зоны 80 % пассажиров перевозится малой авиацией на местных воздушных линиях, оставшиеся 20 % – региональной. В Арктической зоне малой авиацией выполняется более 50 % от всех местных авиаперевозок в стране. Более 80 % арктических местных перевозок являются социально-значимыми и субсидируются государством.

В настоящее время на местных авиалиниях Арктической зоны эксплуатируются как новые, так и устаревшие самолеты: Ан-2, Ан-3, Ан-28, Ан-38, Ан-74, Ан-140, Як-40, Як-42, L-410UVP-E, ATR-42, ATR-72, DHC-6-400, DA40NG и вертолеты: Ми-8 (Ми-14, Ми-17), Ми-26, Ми-2, Ка-26, Ка-226, Ка-32, AW139<sup>c</sup>.

Выполнение взлетно-посадочных операций в Арктике, как правило, связано с повышенным риском. Это обуславливается тем, что временные аэродромы и посадочные площадки имеют минимальную оснащенность в плане аэродромного оборудования, на них почти или полностью отсутствует метеорологическое оборудование, нет статистических данных об особенностях погоды в месте совершения взлета и посадки. Проблема обслуживания посадочных площадок заключается в нехватке квалифицированных метеорологов, синоптиков и невозможности их постоянного проживания в районе аэродромной площадки.

Учитывая изложенные выше факты, для эффективного и безопасного использования авиации в Арктическом регионе необходимо максимально автоматизировать процессы получения, обработки и доведения до экипажей данных о метеорологической обстановке в районе посадочной площадки и на маршруте полета.

## ОПАСНЫЕ МЕТЕОЯВЛЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Климат Арктики – один из самых суровых на Земле. Зимой в Арктике усиленно действуют циклоны. Те, которые приходят со стороны Атлантики, несут частые ветры, обильные осадки и большую облачность, вследствие этого погода очень изменчива: под влиянием мощного циклона возможно резкое потепление на 7–10 градусов. Неустойчивость метеорологической обстановки выражается в резком изменении направления и скорости ветра, понижении высоты облачности, быстром натекании тумана с моря на побережье. Это вызвано

<sup>2</sup> Государственный реестр аэродромов и вертодромов гражданской авиации Российской Федерации [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта: официальный сайт. Режим доступа: <https://www.favt.ru/reestry-aerodromy-vertodromy> (дата обращения: 15.06.2018).

<sup>3</sup> Региональная авиация России и СНГ 2015: V Международная конференция [Электронный ресурс] // Центр стратегических разработок в гражданской авиации. Режим доступа: <http://aviacenter.org/regionalnaya-aviaciya-rossii-i-sng-2015> (дата обращения: 15.06.2018).

влиянием больших водных пространств, близостью теплых и холодных течений. Сильные ветры (до 30–40 м/с) зимой вызывают снежную пургу и поземку [1].

Эти природные факторы в своей совокупности создают сложные, порой экстремальные климатические условия, которые приводят к возникновению опасных для авиации метеорологических явлений. Эти явления носят постоянный, труднопрогнозируемый и значительный по силе воздействия характер.

В районах самолетных и вертолетных посадочных площадок Арктики часто возникают опасные для авиации метеоявления [2, 3, 4]:

- сильный ветер у земли;
- сильная турбулентность;
- сдвиг ветра;
- град, смерч, шквал, ледяной дождь;
- низкая облачность;
- плохая видимость при тумане, снеге, метели, снежной пурге, поземке;
- обледенение;
- гололед;
- низкая температура воздуха.

В связи с особенностями природы, которые характерны для полярных районов, полеты в этом регионе осуществляются по особым правилам. Экипажи воздушных судов имеют специальную подготовку, однако резкая изменчивость погоды затрудняет выполнение полетов по маршрутам, и в особенности взлет и посадку, даже для опытных летчиков. Наиболее повторяющимися являются такие метеоявления, как низкая температура, сильный ветер, обледенение и туманы. Для самолетов и вертолетов, которые применяются на местных авиалиниях, такие метеоявления являются чувствительными, т. к. могут приводить к критическому снижению видимости, значительным ветровым нагрузкам, динамическому давлению и вибрации воздушного судна. Обледенение наиболее вероятно на высоте нулевой изотермы. Оно происходит преимущественно в переохлажденных капельно-жидких облаках и осадках при температуре воздуха от минус 3 до минус 12 °С и зависит от скорости полета воздушного судна. Около 90 % случаев обледенения возникает при воздушной скорости до 600 км/ч (максимальные интенсивность и повторяемость соответствуют интервалу скоростей 400–500 км/ч).

Наиболее характерно возникновение обледенения воздушных судов на этапе захода на посадку и при следовании по глиссаде. Это является наиболее опасным событием, т. к. экипаж не всегда в состоянии принять меры по парированию возникающих ограничений. Для вертолетов обледенение представляет еще большую опасность. Особенно опасно нарастание льда на лопастях несущего винта вертолета, так как происходит очень быстро и неравномерно и приводит к резким колебаниям лопасти, которые передаются всей конструкции вертолета и вызывают большие вибрации ее частей [4, 5].

Для прогнозирования опасных явлений, в том числе и обледенения, требуется информация о профиле температуры. К тому же знание профиля температуры является крайне необходимым для регистрации температурных инверсий.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОПАСНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЙ**

Одним из важных факторов, определяющих динамику развития атмосферных процессов в приземном слое, является профиль температуры. Профиль температуры, с одной стороны, определяет характер устойчивости атмосферы, что влияет на развитие процессов вертикального перемешивания и, как следствие, приводит к возникновению зон турбулентности, восходящих/нисходящих потоков.

Согласно оперативным испытаниям методов прогноза зон возможного обледенения воздушных судов (ВС), выполненным в ГУ «Гидрометцентр России» в период с 1 апреля по 31 декабря 2009 года, максимальная вероятность обледенения ВС наблюдалась в сравнительно узких интервалах температуры и относительной влажности (от 5 до минус 10 °С и больше 85 % соответственно) [5], хотя обледенение ВС может наблюдаться в широком интервале отрицательных температур, но вне этих интервалов вероятность обледенения резко снижается. При этом зависимость от относительной влажности представляется более сильной: именно при относительной влажности RH больше 70 % наблюдалось 90,6 % всех случаев обледенения.

Исходя из данных о профиле температуры, выделяя диапазоны высот, в которых температуры и влажность воздуха находятся в указанных выше пределах, можно прогнозировать возможность обледенения самолета в этих областях. Кроме этого, профиль температуры непосредственно влияет на тягу двигателя самолета и наличие температурной инверсии, является фактором, от которого напрямую зависит безопасность выполнения взлетно-посадочных операций.

Профиль температуры также оказывает влияние на развитие в приземном слое адиабатических процессов, которые связаны с образованием и рассеиванием туманов, развитием облачности и водно-кристаллической структуры облаков, а также процессами обледенения воздушных судов.

В Руководстве по сдвигу ветра на малых высотах<sup>4</sup> описываются условия, когда сдвиг ниже струйного течения может быть значительным и пропорциональным мощности инверсии, при этом максимум ветра обычно наблюдается на высоте ниже 500 м, что соответствует высотам этапов взлета и посадки. На рис. 1 показаны варианты наблюдаемых профилей температуры с инверсиями. Профили № 1 и 4 соответствуют случаю приподнятой инверсии с различной высотой слоя инверсии, профиль № 2 – приземной инверсии, а профиль № 3 – приподнятой инверсии с приземной изотермией.

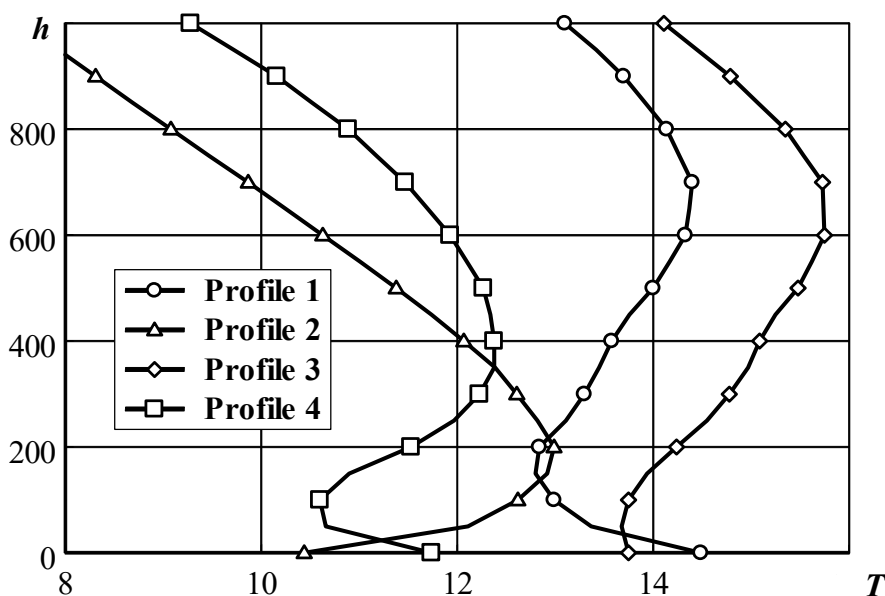


Рис. 1. Профили температуры с инверсиями  
Fig. 1. Temperature profiles with inversions

<sup>4</sup> Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Doc. 9817. AN/449 / Международная организация гражданской авиации. Montreal; Quebec; Canada, 2005.

Температурная инверсия представляет опасность для взлетающих самолетов, так как при входе воздушного судна в вышележащие слои более теплого воздуха снижается тяга двигателей, а скорость полета уменьшается. Поэтому для восстановления заданной скорости на той же высоте в условиях повышения температуры необходимо увеличивать мощность работы двигателей для обеспечения требуемых взлетных характеристик.

Следствием наличия инверсии является снижение вертикальной скорости набора высоты при увеличении температуры (рис. 2). Например, при увеличении температуры на  $10^\circ$  вертикальная скорость уменьшается от 10 до 15 %.

С другой стороны, на выполнение посадки самолета может оказать существенное отрицательное влияние наличие сверхадиабатического профиля температуры в приземном слое (когда градиент возрастания температуры с уменьшением высоты существенно выше, чем для адиабатически уравновешенной атмосферы). В этом случае при попадании самолета в область резкого повышения температуры на посадочной глиссаде приведет к непредвиденному значительному падению тяги, следствием которого будет снижение высоты полета самолета, что может привести к катастрофическим последствиям в условиях малых высот (рис. 3).

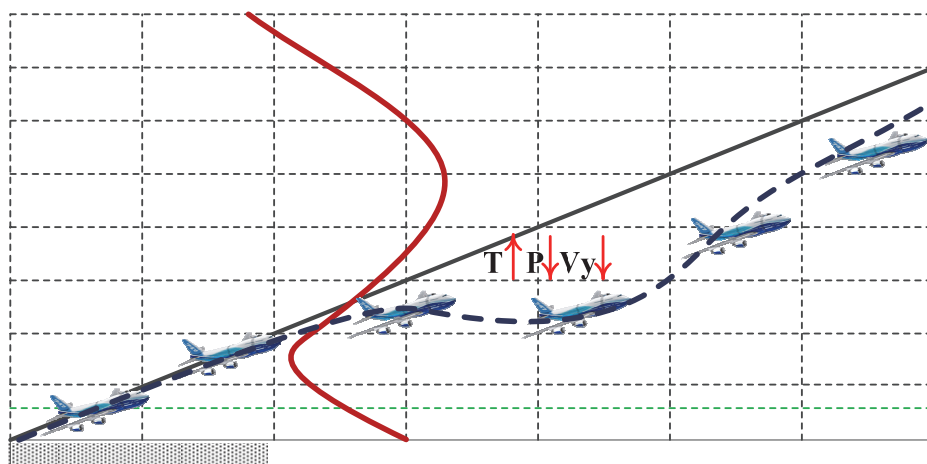


Рис. 2. Влияние приподнятой инверсии на траекторию взлета самолета  
Fig. 2. The effect of the raised inversion on the trajectory of the aircraft takeoff

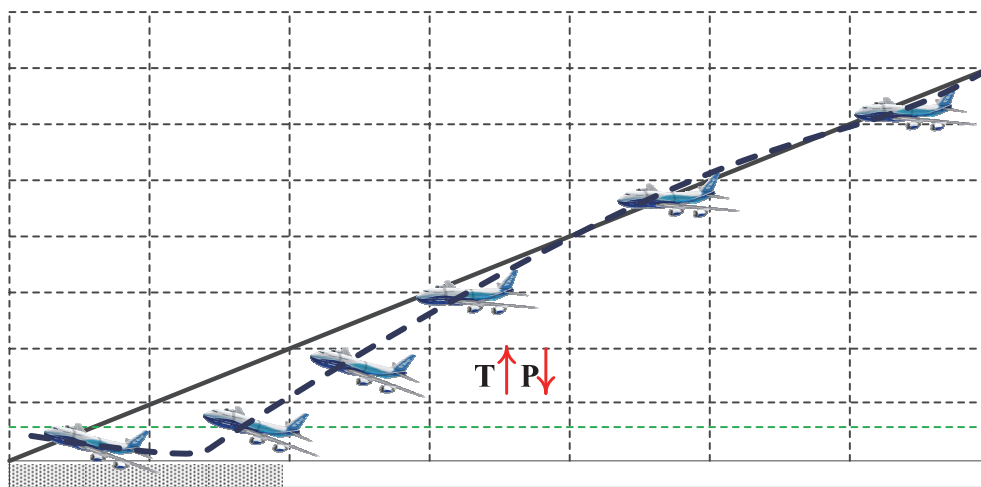


Рис. 3. Влияние сверхадиабатического профиля температуры на траекторию посадки самолета  
Fig. 3. Influence of super adiabatic temperature profile on the trajectory of the aircraft landing

Таким образом, наличие сильных приземных инверсий температуры может оказывать существенное влияние на безопасность выполнения взлетно-посадочных операций. Возможность измерения профиля температуры приземного слоя атмосферы обеспечивает повышение уровня надежности идентификации опасных метеорологических явлений в районе аэродрома.

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗОН ОБЛЕДЕНЕНИЯ, РАДИАЦИОННОГО ТУМАНА, СДВИГА ВЕТРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЛЕКСА НАЗЕМНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ**

В районе посадочной площадки для обеспечения безопасных операций взлета и посадки необходимо иметь возможность получения достоверных данных о текущем и предстоящем в ближайшее время состоянии приземного слоя атмосферы. Для задач мониторинга таких опасных метеорологических явлений локального масштаба, как конвективная турбулентность, обледенение, туманы в районе посадочной площадки, необходимо применение комплекса аппаратуры наземного дистанционного зондирования температурной стратификации (КДЗТС). Такой комплекс должен обеспечить систему наблюдений и прогноза данными с высокой временной (до 5 минут) и высотной степенью разрешения. В состав комплекса должны входить метеостанция (МС), система измерения профиля температуры (СИПТ), устройство обработки данных (УОД).

МС за счет наличия в своем составе датчиков атмосферного давления, температуры воздуха, влажности воздуха, направления и скорости ветра, видимости обеспечивает контроль следующих метеорологических параметров:

- атмосферного давления;
- температуры воздуха;
- относительной влажности воздуха;
- скорости ветра;
- направления ветра;
- видимости текущей погоды.

Комплексирование данных контактного (МС) и дистанционного (СИПТ) мониторинга атмосферы повышает качество идентификации таких опасных метеоявлений, как зоны обледенения, и дает возможность адекватного прогноза условий возникновения радиационного тумана, сдвига ветра и турбулентности в приземном слое [6].

Комплексирование данных СИПТ (SIPT) и МС (MS) решает несколько задач. Первая из них – обеспечение самокалибровки СИПТ. Для этого УОД принимает данные о температуре окружающей среды  $T_{loc}$ , измеренные МС. Модуль обработки данных УОД производит сравнение температуры, которая поступает от МС и от СИПТ при дистанционном зондировании на высоте установки датчика температуры,  $T_{dist}(H = 0)$ . На основании разницы  $T_{loc} - T_{dist}(H = 0)$  модуль обработки данных УОД передает калибровочные коэффициенты в СИПТ, которая осуществляет корректировку весовых коэффициентов, используемых при вычислении профиля температуры по данным об измеряемой яркостной температуре. Вторая задача – прогнозирование зон обледенения по данным о профиле температуры. Как отмечалось ранее, вероятность обледенения воздушного судна максимальна в интервалах температуры от минус 5 до минус 10 °С при относительной влажности более 85 % [7].

Таким образом, для прогнозирования зон обледенения необходима информация о профиле температуры, которая предоставляется СИПТ, и данные о профиле влажности, оценка которого может быть получена на основании данных о влажности, которая поступает от датчика влажности МС.

По измеренной величине относительной влажности  $RH_{loc}$  модуль прогнозирования зон обледенения УОПД выполняет восстановление профиля влажности на основании эмпирических

зависимостей  $RH_{loc}(H)$ , а затем на основании измеренного профиля температуры  $T_{dist}(H)$  и  $RH_{loc}(H)$  определяет диапазон высот, в которых выполняются критерии зон обледенения (рис. 4).

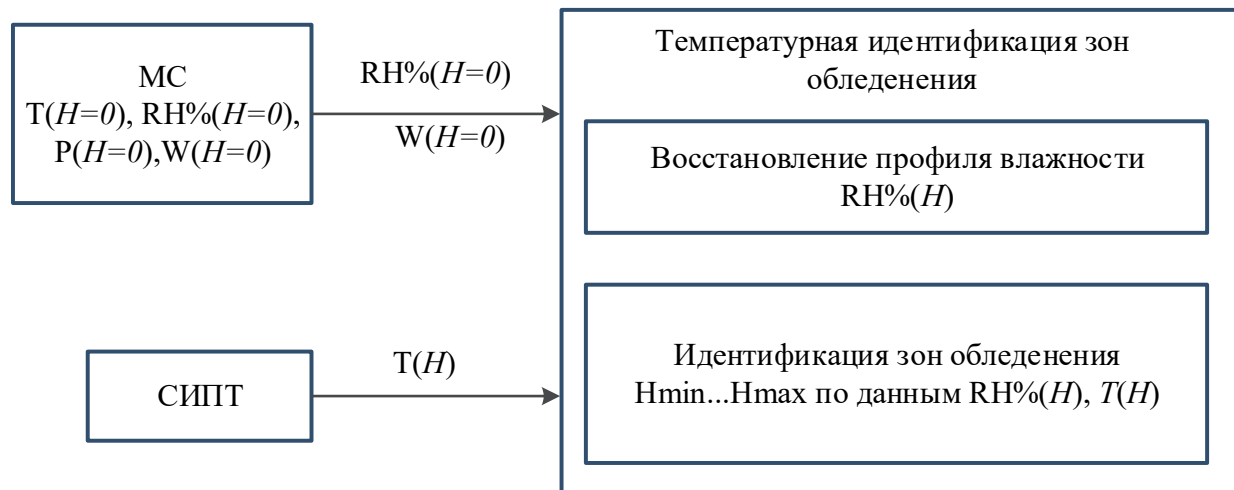


Рис. 4. Комплексирование данных МС и СИПТ для идентификации зон обледенения  
Fig. 4. Complexation of MS and SIPT data for identification of icing zones

Решение задачи прогнозирования радиационных туманов также возможно за счет комплексирования данных МС и СИПТ. Условия возникновения радиационного тумана определяются совокупностью критериев значения градиента температуры, влажности и скорости ветра.

Радиационные туманы образуются над сушей и над районами сплошных льдов как следствие выхолаживания подстилающей поверхности путем излучения. Возникновение радиационных туманов происходит при ясном небе и небольшом (до 2 м/с) ветре (рис. 5).

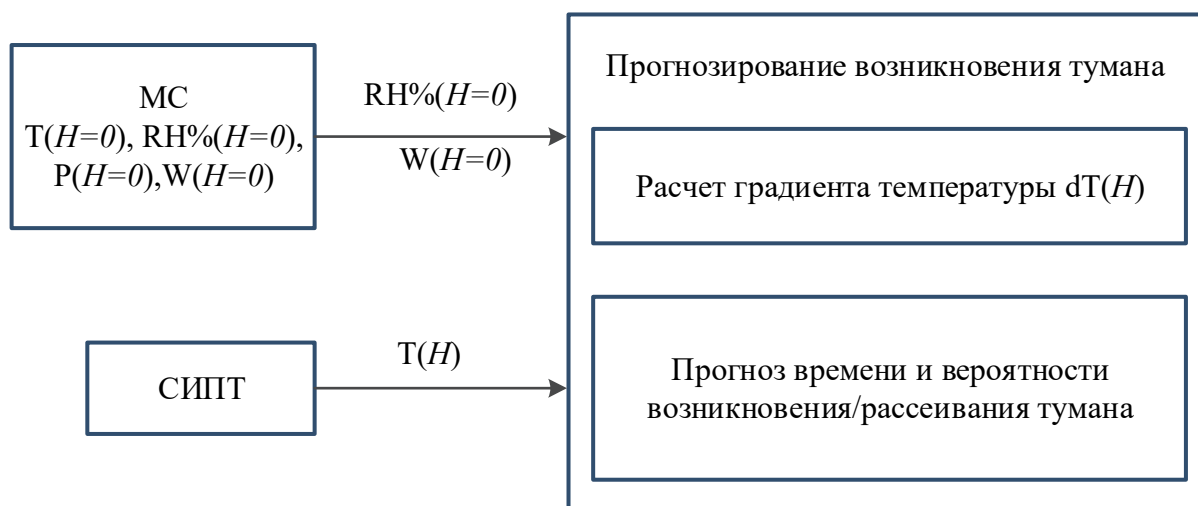


Рис. 5. Комплексирование данных МС и СИПТ для прогнозирования условий возникновения тумана  
Fig. 5. Complexation of MS and SIPT data for fog conditions prediction

В табл. 1 приведен перечень опасных для авиации метеоявлений, которые позволит выявить указанный выше комплект оборудования.

Таблица 1  
Table 1

Перечень опасных для авиации метеоявлений  
The list of dangerous weather phenomena for aviation

| Тип ОМЯ                            | Воздействие на ВС                                                                                                                                                                             | Возможность обнаружения, прогнозирования |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Конвективная турбулентность        | Болтанка, конструктивные повреждения ВС                                                                                                                                                       | возможно                                 |
| Струйные течения низкого уровня    | Возможны трудности при взлете и приземлении                                                                                                                                                   | возможно                                 |
| Сильное обледенение                | Ухудшение аэродинамических характеристик ВС.<br>Возрастание веса и неравномерность центровки.<br>Ухудшение обзора.<br>Проблемы с выпуском/уборкой шасси                                       | возможно                                 |
| Град                               | Повреждение обшивки самолета, лопастей пропеллера и турбин, скольжение на ВПП                                                                                                                 | возможно                                 |
| Осадки                             | Снижение видимости, попадание воды в кабину, отсек двигателя, асимметричное торможение, выкатывание за пределы ВПП                                                                            | возможно                                 |
| Твердые осадки                     | Снижение видимости.<br>Ухудшение аэродинамических характеристик ВС.<br>Скопление в гондоле двигателя.<br>Ухудшение торможения.<br>Затенение огней ВПП                                         | возможно                                 |
| Туман                              | Сильное снижение видимости<br>Создание сложных условий для посадки                                                                                                                            | возможно                                 |
| Туман<br>Дымка<br>Мгла<br>Метель   | Снижает видимость, дает ложное представление о горизонтальной видимости на аэродроме (может достигать больших площадей в этом случае представляет опасность, также опасно в горной местности) | возможно                                 |
| Внезапное временное усиление ветра | Сдвиг ветра, вызывающий трудности при взлете и посадке                                                                                                                                        | возможно                                 |

**СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ НА БОРТ ВОЗДУШНОГО СУДНА ИНФОРМАЦИИ  
О МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ  
В РАЙОНЕ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ**

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники, улучшением ее характеристик, таких как скорость вычисления, снижение массогабаритных характеристик, появилась возможность использовать широкий спектр программного обеспечения, устанавливаемого на портативные устройства. Интерфейс портативных вычислительных устройств на данный момент позволяет интегрировать/коммутировать широкий спектр разнообразных приборов между собой, что существенно расширяет возможности и способы решения разнообразных за-

дач. Развитие технологий связи привело к качественному росту пропускной способности каналов связи, что позволяет в короткие сроки передавать большой объем данных на удаленные портативные устройства.

Для передачи данных о метеорологической обстановке в районе посадочной площадки наиболее целесообразно опираться на существующую технологию сервиса информационного обслуживания в полете – FIS (Flight information services), который способен обеспечить регулярный доступ к обновляемой метеорологической (MET) информации. Данная технология позволяет в зависимости от способа доведения информации осуществлять адресную в контрактном режиме (FIS-C) или широкоэвещательную доставку сообщений (FIS-B)<sup>5</sup>.

Система передачи информации FIS-B использует односторонний эвещательный протокол. Он является «односторонним» в том смысле, что информация передается только от сервера к принимающему воздушному судну без необходимости для этого судна требовать эту информацию от сервера и подтверждать ее получение. Это типичный «безадресный» способ в том смысле, что информация, предоставляемая сервером, не адресуется конкретному летательному аппарату, а передается для полезного использования любому соответственно оборудованному аппарату, который может оказаться в зоне покрытия. Эти характеристики определяют эвещательный протокол, хорошо пригодный для большинства летательных аппаратов в зоне приема. К тому же простота этого протокола ведет к снижению стоимости как бортовой авионики, так и наземной инфраструктуры. Предоставление полетной информации FIS-B рекомендательного характера для пилотов позволит повысить их осведомленность о полетных условиях. Данная информация не будет носить характер команд и будет направлена на безопасное проведение полетных операций в соответствии с существующими правилами. Используя эту информацию, экипажи получают возможность заранее прогнозировать свои действия в условиях сложной метеорологической обстановки. Технология FIS-B обеспечивает автоматическое поддержание актуальной метеорологической информации, поскольку данные FIS автоматически удаляются при получении новой версии либо когда истекло время актуальности этих данных. Таким образом, гарантированно снижается информационная нагрузка на экипаж по обработке неактуальной информации.

Технология FIS-B включает в себя три взаимосвязанных элемента:

- 1) наземные компоненты, предназначенные для сбора, обработки и хранения информации AIS и MET;
- 2) телекоммуникационные компоненты, предназначенные для передачи на земле и приема на борту ВС цифровых данных (линия передачи данных «земля – борт»);
- 3) бортовые компоненты, предназначенные для хранения, обработки, представления информации AIS и MET бортовым приложениям и экипажу.

Универсальность технологии позволяет организовывать транспортировку данных различных типов, укладывающихся в каналные ограничения максимальных размеров блоков.

Для передачи данных по технологии FIS-B сможет использоваться аппаратура автоматического зависящего наблюдения эвещательного типа (АЗН-В), которая является основой будущей системы организации воздушного движения, строящейся на принципах CNS/АТМ с широким использованием технологий спутниковой навигации, цифровой связи и наблюдения [8].

ИКАО разработаны рекомендации по совершенствованию каналов связи. Предусмотрен поэтапный переход к использованию более современных методов передачи данных. Такими являются режимы передачи данных в ОБЧ-диапазоне 1090ES и VDL-4. Использование для реализации АЗН-В двух технологий в стандарте ИКАО (1090ES/VDL4) предоставляет максимальное возможное разделение технологий по классам ВП и районам полетов. Каналы передачи данных 1090ES предназначены для пользователей верхнего воздушного пространства класса А на вы-

<sup>5</sup> FIS-B and How Does it Work [Электронный ресурс] // The Balance Careers. Режим доступа: <https://www.thebalance.com/what-is-fis-b-282560> (дата обращения: 15.06.2018).

сотах более 8100 м и аэродромного воздушного пространства класса С<sup>6</sup>. VDL-4 предназначена для внеаэродромного воздушного пространства класса С на высотах до 4200 м и класса G в районах интенсивной авиационной деятельности. ЛПД VDL-4 является универсальной и обеспечивает не только работу АЗН-В («Out» и «In»), но и ряд других функций в радиовещательном режиме типа FIS-B, FIS-B, A-SMGCS, DGNSS.

В рамках реализации «Программы внедрения средств вещательного автоматического зависимого наблюдения в Российской Федерации (2011–2020 годы)» в 2016 году с положительными результатами реализован пилотный проект в Ямало-Ненецком автономном округе «Ямал-АЗН». Для организации каналов связи использовались комплекты отечественного оборудования, состоящие из наземных станций АЗН-В VDL-4, бортового и мобильного оборудования. В рамках этого проекта ведутся работы по практическому применению технологии АЗН-В специалистами АО «Газпром». На ряде вертолетов установлены бортовые станции АЗН-В VDL-4, имеется практический опыт использования наземного сегмента.

Таким образом, становится очевидным, что в Арктической зоне для повышения осведомленности пилотов о полетных условиях в районе посадочных площадок целесообразно оснастить их КДЗТС. Для передачи информации на борт воздушного судна использовать элементы технологии FIS-B, базирующейся на ЛПД АЗН-В VDL-4. Это позволит в режиме, близком к реальному времени, вести мониторинг метеорологической обстановки и передачу на борт воздушного судна информации об актуальной метеорологической обстановке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль и место местных авиалиний в Арктике с каждым годом растет. В целях оперативно-го информирования экипажей воздушных судов о фактической погоде в районе посадочной площадки необходимо вести регулярные метеорологические наблюдения, сбор и анализ метеорологических данных. Для повышения достоверности этих сведений данные наблюдения необходимо вести непрерывно. С целью исключения человеческого фактора, а также в связи с трудностями в обеспечении непрерывного пребывания людей в районах арктических посадочных площадок необходимо максимально автоматизировать процессы сбора, обработки и предоставления экипажам воздушных судов метеорологической информации о фактической погоде в районе посадочной площадки. Современные способы дистанционного зондирования атмосферы в сочетании с комплексным подходом к обработке данных позволяют заблаговременно выявить предпосылки возникновения таких опасных для авиации метеоявлений, как обледенение и радиационные туманы. Данные о направлении и скорости ветра на малых высотах, а также информация о состоянии метеообразований позволят дать дополнительные данные об опасных метеоявлениях в районе посадочной площадки. Для повышения достоверности и оправданности прогнозов необходимо расширять сеть полярных станций, производить их оснащение автоматизированными средствами метеорологического наблюдения. При формировании требований к метеоаппаратуре, размещаемой в Арктике, необходимо особое внимание уделять ее устойчивости к сложным метеорологическим условиям и возможности функционировать в энергосберегающем режиме. Современные средства передачи данных позволяют создавать надежные каналы связи для доставки оперативной метеоинформации на борт воздушного судна. Наиболее целесообразно использовать для этих целей принятую в ИКАО технологию FIS-B и линии связи стандартов 1090 ES и VDL-4. В перспективе представляется целесообразным рассмотреть возможность дистанционной активации функции передачи метеоинформации при полете воздушного судна к посадочной площадке по каналу «борт – земля», а также дистанци-

---

<sup>6</sup> Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance – Broadcast. DO-242A. (ADS-B) / Radio Technical Commission for Aeronautics.

онному включению и выключению наземного оборудования, в частности посадочных огней вертолетной площадки. При интеграции метеоборудования со средствами связи типа «Гонец», Globalstar, Inmarsat возможность прогнозирования метеоявлений не только в Арктических районах, но и по всему миру возрастет многократно, т. к. данные наблюдений можно будет обработать на мощных вычислительных средствах, применить для расчетов современные прогностические модели. Экипажи воздушных судов получают дополнительную метеоинформацию, и за счет этого возрастет их ситуационная осведомленность. Таким образом, оперативное предоставление метеоинформации в автоматическом режиме позволит значительно повысить безопасность совершения взлетно-посадочных операций в Арктической зоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шерстюков Б.Г.** Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 39–67.
2. **Баранов А.М.** Авиационная метеорология / Н.И. Мазурин, С.В. Солонин, И.А. Янковский. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 281 с.
3. **Акселевич В.И., Мазуров Г.И., Хайруллин К.Ш.** Гидрометеорологические опасности Арктики и методика их мониторинга // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 29–37.
4. **Мазуров Г.И., Нестерук В.Н.** Метеорологические условия и полеты вертолетов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 254 с.
5. **Шакина Н.П.** О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения воздушных судов / Е.Н. Скриптунова, А.Р. Иванова, И.А. Горлач // Информационный сборник No. 37. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2010. С. 142–153.
6. **Болелов Э.А.** Комплексная обработка метеоинформации в аэродромных мобильных комплексах метеолокации и зондирования атмосферы / Ю.Н. Кораблев, Н.А. Баранов, С.С. Демин, А.А. Ещенко // Научный сборник ГосНИИ ГА. 2018. № 20(331). С. 82–92.
7. **Баранов Н.А., Турчак Л.И.** Оценка риска обледенения воздушных судов по данным температурного зондирования атмосферы // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017) 2017. М.: МАИ, 2017. С. 732–734.
8. **Бочкарев В.В., Кравцов В.Ф., Крыжановский Г.А.** Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации. М.: Академкнига, 2003. 415 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Кораблев Юрий Николаевич**, заместитель главного конструктора АО «Концерн «Международные аэронавигационные системы», соискатель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, korablevyury@yandex.ru.

## OPERATIONAL NOTIFYING AIRCRAFT CREW ABOUT DANGEROUS METEOROLOGICAL PHENOMENA IN THE ZONES OF ARCTIC LANDING SITES

Yury N. Korablev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PC "International aeronavigation systems", Moscow, Russia

### ABSTRACT

Meteorological support for aviation is an essential element of an integrated system for air traffic management as incorrect meteorological information about hazardous meteorological conditions has a significant impact on the level of flight safety and on all aspects of air traffic management. At present, a number of decisions have been taken at the state level in Russia, according to which a large-scale program is being implemented to develop the infrastructure of the Far North and the Arctic regions, the development of territories, the coast of the Northern Sea Route, and the development of mineral deposits. The climate of the Arctic is one of the severest on Earth. The instability of the meteorological situation is expressed in a sharp change in the wind direction and speed, a decrease in the height of the cloud cover, the rapid inflow of fog from the sea on the coast. Strong winds cause a snowstorm and drifting snow, in summer, under the influence of a powerful cyclone, a sudden increase in air temperature is possible. These natural factors together create adverse, at times extreme climatic conditions, which lead to the emergence of meteorological hazards dangerous to aviation. These phenomena are difficult to predict and significant in terms of impact. Making landing and takeoff in the Arctic, as a rule, is associated with an increased risk. This is due to the fact that temporary aerodromes and landing sites have minimal aerodrome equipment, meteorological provision is almost completely or partially not available, there are no statistical data on weather peculiarities at the place of take-off and landing. The problem of servicing landing sites is the use of outdated equipment, lack or inability of permanent maintenance staff residing in the area. Taking into account the above facts, for effective and safe use of aviation in the Arctic region, it is necessary to automate as much as possible the processes of obtaining, processing and reporting to the crews data on the meteorological situation in the area of the landing site and on the flight route. The article discusses the need to use automated systems for collecting, processing and transmitting meteorological information to inform crews of aircraft carrying out take-offs and landings in the areas of aircraft and helicopter landing areas of the Arctic zone about the state of the surface layer of the atmosphere and the altitudes where icing is possible.

**Key words:** hazardous meteorological phenomena, atmospheric sounding, temperature profile meter, weather station, landing areas, icing, information service in flight.

### REFERENCES

1. Sherstyukov, B.G. (2016). *Klimaticheskie usloviya Arktiki i novye podhody k prognozu izmeneniya klimata* [Arctic climatic conditions and new approaches to the forecast of climate change]. Arctic and North, no. 24, pp. 39–67 (in Russian)
2. Baranov, A.M., Mazurin, N.I., Solonin, S.V. and Yankovsky, I.A. (1966). *Aviatsionnaya meteorologiya* [Aeronautical meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 281 p. (in Russian)
3. Akselevich, V.I., Mazurov, G.I. and Khayrullin, K.Sh. (2017). *Gidrometeorologicheskie opasnosti Arktiki i metodika ikh monitoringa* [Hydrometeorological Hazards of the Arctic and Methodology for their Monitoring]. Scholarly Notes of Transbaikal State University. Ser. Physics, Mathematics, Engineering, Technology, vol. 12, no. 4, pp. 29–37. (in Russian)
4. Mazurov, G.I. and Nesteruk, V.N. (1992). *Meteorologicheskie usloviya i polety vertoletov* [Meteorological conditions and helicopter flights]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 254 p.
5. Shakina, N.P., Skriptunova, E.N., Ivanova, A.R. and Gorchach, I.A. (2010). *O rezultatakh ispytaniya metoda prognoza zon vozmozhnogo obledeneniya vozdushnykh sudov* [On the results of testing the forecast method for zones of possible icing of aircraft]. *Informatsionnyy sbornik No. 37. Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Information collection No. 37. Results of testing new and improved technologies, models and methods for hydro-meteorological forecasts]. Moscow, Obninsk: IG-SOTSIN, pp. 142–153. (in Russian)

6. **Bolelov, E.A., Korablev, Y.N., Baranov, N.A., Demin, S.S. and Eshchenko, A.A.** (2017). *Kompleksnaya obrabotka meteoinformatsii v aerodromnykh mobilnykh kompleksakh meteorologicheskoy i zondirovaniya atmosfery* [Complex processing of meteorological information in aerodrome mobile complexes of weathering and sounding of the atmosphere]. Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), vol. 20, no. 331, pp. 82–92. (in Russian)

7. **Baranov, N.A. and Turchak, L.I.** (2017). *Otsenka riska obledeneniya vozdukhnykh sudov po dannym temperaturnogo zondirovaniya atmosfery* [Assessment of the risk of icing of aircraft based on temperature sounding of the atmosphere]. Materials of the 20th Jubilee International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Systems (VMSPPS'2017). Moscow: MAI, pp. 732–734. (in Russian)

8. **Bochkarev, V.V., Kravtsov, V.F. and Kryzhanovskiy, G.A.** (2003). *Kontseptsiya i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoy aviatsii* [Concept and CNS/ATM systems in civil aviation]. Moscow: Akademkniga, 415 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Yury N. Korablev**, Deputy Chief Designer of JSC "International Aeronavigation Systems Concern", applicant of the Air Transport Radio-Electronic Equipment Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, korablevyury@yandex.ru.

Поступила в редакцию 16.06.2018  
Принята в печать 18.09.2018

Received 16.06.2018  
Accepted for publication 18.09.2018

ББК 05  
Н 34  
Св. план 2018

Научный Вестник МГТУ ГА  
Том 21, № 05, 2018  
Civil Aviation High TECHNOLOGIES  
Vol. 21, No. 05, 2018

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.

---

Подписано в печать 15.10.18 г.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

15,5 усл. печ. л.

Заказ № 375 / 113

Тираж 100 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: mail@phzhukovskogo.ru

Подписной индекс в каталоге Респечати 84254  
© Московский государственный  
технический университет ГА, 2018