



ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ ЭКИПАЖА САМОЛЁТА ПО ДАННЫМ ВИДЕООКУЛОГРАФИИ

КУРАВСКИЙ Л.С.

*Московский государственный психолого-педагогический университет
(ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com*

ЮРЬЕВ Г.А.

*Московский государственный психолого-педагогический университет
(ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com*

ЗЛАТОМРЕЖЕВ В.И.

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
(ФГУП «ГосНИИАС»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru*

ГРЕШНИКОВ И.И.

*Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
(ФГУП «ГосНИИАС»), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru*

ПОЛЯКОВ Б.Ю.

*Московский государственный психолого-педагогический университет
(ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6457-9520>, e-mail: deslion@yandex.ru*

Представлены математические модели и методы оценки уровня подготовки экипажа на основе данных видеоокулографии. Полученные результаты опираются на сравнения исследуемых фрагментов глазодвигательной активности пилотов с сопоставимыми паттернами данных видеоокулографии различных типов и качества исполнения, содержащимися в заранее сформированной специализированной базе данных. Для получения оценок применяется сложная комбинация методов анализа случайных процессов и многомерного статистического анализа. «Интеллект» диагностических средств содержится в эмпирических данных и может гибко изменяться по мере их накопления. Рассмотренный пример определения режима полета и квалификации пилота по данным видеоокулографии позволяет говорить о возможности значимой дискриминации траекторий движения взгляда пилотов на разных фазах полета и значимой дискриминации траекторий движения взгляда опытных и неопытных пилотов на определенных фазах полета. Важным новым компонентом представленных результатов является дискриминантный анализ для решения задачи классификации лётных упражнений, построенный на принципах квантовых вычислений. Область применения рассмотренного подхода не ограничивается авиационными приложениями и может быть распространена на близкие по содержанию задачи.

Ключевые слова: оценка уровня подготовки экипажа, видеоокулография, дискриминантный анализ, многомерное шкалирование, кластерный анализ, показатели глазодвигательной активности.

Финансирование. Эта работа выполнена как часть проекта «SAFEMODE» (грант № 814961) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект UID RFMEFI62819X0014).



Для цитаты: Куравский Л.С., Юрьев Г.А., Златомрежев В.И., Грешников И.И., Поляков Б.Ю. Оценка действий экипажа самолёта по данным видеоокулографии // Экспериментальная психология. 2021. Том 14. № 1. С. 204–222. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2021140110>

ASSESSING THE AIRCRAFT CREW ACTIVITY BASING ON VIDEO OCULOGRAPHY DATA

LEV S. KURAVSKY

Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

GRIGORY A. YURYEV

Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

VALENTIN I. ZLATOMREZHEV

State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

IVANI. GRESHNIKOV

State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru

BORISLAV Y. POLYAKOV

Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6457-9520>, e-mail: deslion@yandex.ru

Mathematical models and methods for crew training level assessing based on video oculography data are presented. The results obtained are based on comparing the studied fragments of oculomotor activity of pilots with comparable patterns of video oculography data of various types and performance quality contained in a pre-formed specialized database. To obtain estimates, a complex combination of random process analysis and multivariate statistical analysis is used. The “intelligence” of diagnostic tools is contained in empirical data and can flexibly change as they accumulate. The considered example of determining the flight mode and pilot qualification based on video oculography data allows us to talk about the possibility of significant discrimination of the gaze movement trajectories of pilots at different flight phases and significant discrimination of the gaze movement trajectories of experienced and inexperienced pilots at certain phases of flight. An important new component of the presented results is a discriminant analysis for solving the problem of flight exercises classification, based on the principles of quantum computing. The scope of the considered approach is not limited to aviation applications and can be extended to tasks that are similar in content.

Keywords: crew training level assessing, video oculography, Discriminant Analysis, Multidimensional Scaling, Cluster Analysis, oculomotor activity indexes.

Funding. This work was performed as part of the “SAFEMODE” project (grant # 814961) with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (UID RFMEFI62819X0014 project).

For citation: Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Greshnikov I.I., Polyakov B.Y. Assessing the Aircraft Crew Activity Basing on Video Oculography Data. *Экспериментальная психология = Experimental Psychology (Russia)*, 2021. Vol. 14, no. 1, pp. 204–222. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2021140110> (In Russ.).



Введение

Актуальность проблемы эффективного учета человеческого фактора при проектировании и эксплуатации транспортных средств признается специалистами и регулирующими органами профильных отраслей. На сегодняшний день этот фактор наряду с уровнем профессиональной подготовки становится одной из основных причин возникновения критических ситуаций в полете. При этом его влияние станет еще более значимым в будущем, благодаря ряду тенденций, таких как повышение уровня функциональности, автоматизации и интеллектуализации бортового оборудования воздушных судов (ВС).

В настоящее время этот фактор и его влияние на развитие критических ситуаций в полете все еще недостаточно учитывается на этапах анализа безопасности и проектирования кабины экипажа. Современный подход к его учету, как правило, базируется только на анализе статистики произошедших инцидентов и происшествий, что является основным его недостатком. В результате, существующие методики и рекомендации, учитывающие человеческий фактор, направлены лишь на изменения в процессах обучения лётного состава или процедурах эксплуатации плохо спроектированных систем и устройств, не позволяя количественно оценивать риски в конкретных полетах и выявлять факторы, способствующие возникновению опасных лётных ситуаций. Проблема заключается, во-первых, в отсутствии приемлемых математических моделей и методов и, во-вторых, в отсутствии эффективных и обоснованных средств оценки состояния экипажей, а также обусловленных этими состояниями мер по снижению рисков пилотирования.

Проведенные исследования [5; 6] показали, что в настоящее время наиболее перспективными и валидными средствами оценки состояния экипажей являются неинвазивные технологии, основанные на анализе характеристик распределения визуального внимания (видеоокулография и оценка параметров глазодвигательной активности); при этом для регистрации движения взгляда пилотов применяются бесконтактные технические средства — *айтрекеры*, которые позволяют исключить субъективную оценку показателей состояния пилота.

В этой работе рассматриваются методы оценки уровня подготовки и состояния экипажа на основе данных видеоокулографии и перспективы их применения для решения практических задач.

К настоящему времени получен ряд результатов, связанных с выявлением уровня подготовки экипажа [13–22], где в подавляющем большинстве случаев рассматриваются только параметры траектории воздушного судна и не учитываются другие характеристики. Ограничения, которые делают невозможным реальное практическое применение этих результатов, детально рассмотрены в работах [7; 9–12]. Следует отметить, что многие из указанных ограничений обусловлены применением очевидных традиционных метрик для сравнения фрагментов полетов.

Указанные выше проблемы преодолеваются, опираясь на математические модели и методы оценки уровня подготовки экипажа, рассмотренные в данной статье. В качестве иллюстрации представлен пример определения режима полета и квалификации пилота по данным видеоокулографии на основе сравнений оценок правдоподобия траекторий движения взгляда. Этот пример позволяет говорить о возможности значимой дискриминации траекторий движения взгляда пилотов на разных фазах полета и значимой дискриминации траекторий движения взгляда опытных и неопытных пилотов на определенных фазах полета, что свидетельствует о перспективности применения представленного подхода для анализа данных видеоокулографии.



Полученные результаты могут применяться — в том числе в режиме реального времени — для оценки работы экипажей, включая контроль качества их обучения; поддержки формирования инструкторских оценок; обеспечения современных форм адаптивного обучения экипажей; сравнения различных вариантов форматов системы экранной индикации и пультов управления самолётными системами в кабине экипажа; оптимизации компоновки индикаторов и пультов кабины экипажа ВС; оценки влияния информационно-управляющего поля кабины экипажа ВС и условий полета на риски возникновения авиационных инцидентов; сравнения различных средств и программ обучения лётного состава при проектировании современных летательных аппаратов.

Эти результаты существенно отличаются от вероятностных методов, применяемых при управлении системами, прогнозировании технических неисправностей, мониторинге состояния и поддержке управляющих действий пилотов [3].

Основные компоненты подхода: математические модели, методы и связи между ними

Результаты работы экипажа представляются наборами временных рядов, описывающих глазодвигательную активность (ГДА), сопутствующую действиям пилотов. Этапы оценки уровня подготовки экипажа на основе анализа данных видеоокулографии, включая математические модели, методы и связи между ними, показаны на рис. 1.

Разработанная концепция оценки уровня подготовки экипажа [7; 9–12] опирается на интегральные сравнения исследуемых фрагментов полета с сопоставимыми фрагментами из специализированной базы данных, содержащей паттерны, характеризующие выполнение лётных упражнений экипажами с различным уровнем подготовки, включая нормальное и аномальное пилотирование. На исследуемый фрагмент переносятся характеристики ближайшего паттерна из специализированной базы данных. При этом выполняется распознавание аномальной деятельности и определение параметров полета, характеризующих ошибки экипажа, с целью их интерпретации.

Под *паттерном* понимается представление определенного фрагмента полета, или *лётного упражнения*, с помощью набора релевантных параметров. Эти паттерны соотносятся с одним из распознаваемых уровней сформированности навыков пилотирования.

Аномальность деятельности выявляется через принадлежность к соответствующим кластерам паттернов. Система позволяет выявлять параметры, ответственные за принадлежность к определенным кластерам, а также за различия между паттернами.

Информация, собранная в специализированной базе данных, должна включать в себя *параметры выполнения упражнений*, а также соответствующие комментарии, содержащие экспертные оценки из различных источников. Комментарии экспертов должны выявлять слабые стороны работы экипажей, включая информацию о типичных ошибках в терминах параметров деятельности и советы инструктору о том, как исправить указанные недостатки.

Общее допущение заключается в том, что действия экипажа, выполняемые разными стилями и с разным качеством, а также лётные упражнения разных типов отделяются друг от друга в многомерном пространстве, сформированном в специально подобранных метриках. Это утверждение обосновывается результатами вычислительных экспериментов, использующих релевантные эмпирические данные. Общий подход к решению задачи, вытекающий из этого допущения, опирается на выбор паттернов.



Разработанный подход предполагает применение сложной комбинации методов анализа случайных процессов и многомерного статистического анализа. «Интеллект» диагностических средств содержится в эмпирических данных и может гибко изменяться по мере их накопления. Предположения, адекватность которых требует обоснования, не используются. Данный подход опирается на экспериментальные данные, включающие информацию о распределении визуального внимания пилотов, а также экспертные оценки результатов выполнения лётных упражнений.

Получаемые в процессе анализа результаты сравнения исследуемых фрагментов полета и данных видеоокулографии с сопоставимыми образцами фрагментов полетов и данных видеоокулографии из специализированной базы данных представляются оценками, построенными в результате многомерного статистического анализа траекторий движения глаз или временных рядов первичных показателей ГДА [1].

Опираясь на результаты последовательного выполнения *метода главных компонентов, многомерного шкалирования и кластерного анализа* траекторий движения глаз, формируются кластеры фрагментов полетов различных типов и качества исполнения, включая аномальные. Они используются для определения вероятностных классификационных правил разделения различных типов и уровней качества выполнения упражнений в пространстве шкалирования, а также аномально выполненных действий экипажа.

Вычисление вероятностного профиля принадлежности к целевым кластерам, на основе которого строится итоговое заключение, обеспечивается с помощью *дискриминантного анализа*. Один из применяемых способов оценки уровня подготовки экипажа при этом сводится к определению кластера и качества выполнения анализируемого фрагмента полета, а также оценок вероятностей принадлежности его к целевым кластерам, связанным с типами упражнений и качеством пилотирования.

При работе с временными рядами первичных показателей ГДА, для содержательного анализа причин выявляемых аномальностей выполняется детализация вкладов параметров в различия фрагментов полетов в заданной метрике, а именно: вычисляются относительные вклады исследуемых параметров в элементы матриц взаимных расстояний, что позволяет определить параметры, характеризующие ошибки пилота, с целью выявления их причин.

Ключевым элементом применяемого подхода является метрика правдоподобия для сравнения траекторий движения взора, без применения которой многомерное шкалирование и кластерный анализ не дали бы желаемых результатов. Известные ранее метрики этот результат не обеспечивают.

Количественная оценка уровня подготовки экипажа допускает **три способа определения класса навыков:**

— прямое сравнение анализируемых упражнений с паттернами деятельности из базы данных, используя применяемую метрику (при этом на исследуемое упражнение переносятся характеристики ближайшего паттерна);

— вероятностные оценки распознавания класса навыков с помощью или классического дискриминантного анализа, используя выборочные функции распределения расстояний упражнений до центров кластеров в пространстве шкалирования, или квантового дискриминантного анализа [8];

— выбор класса навыков с помощью вероятностного профиля пребывания в диапазонах параметров деятельности, используя байесовские оценки правдоподобия.



Рассматриваемый подход можно применять даже при малых выборках лётных упражнений, поскольку и в этом случае можно выбрать паттерн и рассчитать вклад параметров во взаимные расстояния.

Эксперт, принимающий участие в процедуре анализа результатов выполнения лётных упражнений, отвечает за:

- выбор кластеров аномальных упражнений в пространстве шкалирования;
- выявление и интерпретацию аномалий и ошибок.

Применяемый подход к оценке уровня подготовки экипажа содержит следующие *элементы новизны*:

- основной формой представления анализируемых данных являются матрицы взаимных расстояний исследуемых процессов в метрике правдоподобия;
- разработан и программно реализован дискриминантный анализ, построенный на принципах квантовых вычислений;
- представление фрагментов полетов в пространстве шкалирования и их распределение по типам путем применения многомерного шкалирования к матрицам взаимных расстояний и последующего кластерного анализа.

При решении практических задач, в случае малых выборок лётных упражнений, целесообразно вычислять относительные вклады параметров во взаимные расстояния между упражнениями, а в случае больших выборок — или проводить дискриминантный анализ (в классическом или квантовом варианте), или оценивать вероятности принадлежности к релевантным кластерам с помощью вероятностных профилей пребывания в определенных системой диапазонах значений параметров с детализацией оценок по каждому параметру.

На *этапе предварительной обработки* выбираются временные интервалы для сравнения упражнений, и проводится нормализация данных. Определяются подмножества временных рядов, соответствующие общим временным интервалам, которые подходят для сравнения анализируемых упражнений одного и того же типа. Прежде чем приступить к дальнейшим вычислениям, временные ряды, характеризующие историю выполнения упражнений, приводят к единой шкале.

Применение рассмотренных математических методов и моделей для решения практических задач обеспечивается инструментальным средством «The Intelligent System for Flight Analysis» (ISFA) предназначенным для анализа поведения сложных систем, представленных изменяющимися во времени наборами параметров [7; 9–12]. Это средство первоначально разрабатывалось для оценки результатов выполнения лётных упражнений, но позднее стало применяться для анализа данных видеоокулографии. Оно реализовано в среде графического программирования *LabVIEW* и официально зарегистрировано в Роспатенте [4].

Марковская модель представления динамики перемещений взора, связанная с метрикой правдоподобия для сравнения траекторий его движения

Сравнение динамики перемещений взора пилотов по зонам индикации опирается на *оценки правдоподобия, количественно определяющие степень согласованности движений взора, измеренных при выполнении различных лётных упражнений.*

Для представления динамики перемещений взора по зонам индикации используются *марковские процессы с дискретными состояниями и дискретным временем (цепи Маркова).* В этих моделях зонам индикации соответствуют определенные состояния, образующие

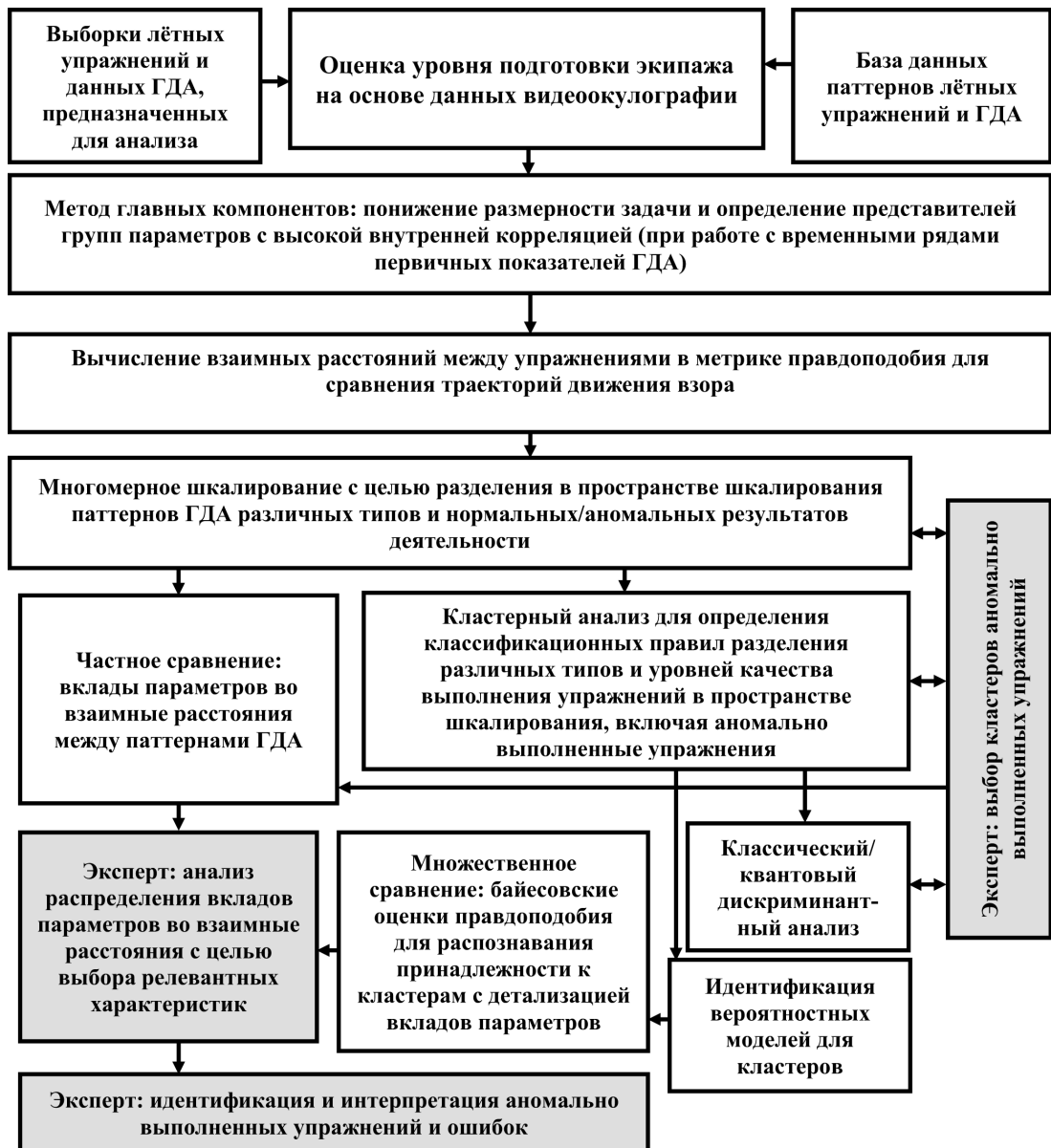


Рис. 1. Оценка уровня подготовки экипажа на основе анализа данных видеоокулографии: математические модели, методы и связи между ними (действия экспертов выделены цветом)

полную систему (т. е. данные состояния охватывают все допустимые области, куда может быть направлен взор). Пребывание в состоянии определяется нахождением взгляда в соответствующей ему зоне индикации. Такт дискретного времени — в зависимости от объема накопленных эмпирических данных — либо задается определенным (и, как правило, небольшим) интервалом времени, либо соответствует интервалу времени, определяющему переход от одной фиксации взгляда к другой. Вероятности переходов между состояниями являются параметрами модели. Каждому исследуемому лётному упражнению $l \in \{0, \dots, z\}$



соответствует своя модель с уникальным набором вероятностей переходов между состояниями.

Перемещения взгляда характеризуются последовательностями пройденных зон индикации, которые в терминах данной модели интерпретируются как последовательности состояний.

Динамика вероятностей пребывания в состояниях модели как функций дискретного времени определяется следующим матричным уравнением:

$$p(t+1) = M_l p(t),$$

где t – дискретное время; $0 \leq t \leq T$; $t, T \in N$; T – конечный момент времени; N – множество натуральных чисел; вектор $p(t) = (p_0(t), \dots, p_n(t))^T$ – представляет вероятности пребывания в состояниях модели в момент времени t ; n – число состояний марковского процесса; $M_l = \|m_{ij,i}\|$ – стохастическая матрица вероятностей перехода между состояниями цепи Маркова порядка n , в которой $m_{ij,i}$ – вероятность перехода из состояния j в состояние i для исследуемого лётного упражнения l .

Идентификация рассмотренных марковских моделей для исследуемых упражнений $l \in \{0, \dots, z\}$ выполняется, используя экспериментальные данные о частотах переходов из одной зоны индикации в другую. Каждое исследуемое упражнение l имеет свою идентифицированную матрицу M_l .

Для вычисления вероятностей $P(v_r | C_l)$ прохождения последовательности из r состояний марковского процесса при условии принадлежности к исследуемому упражнению l , где C_l – факт принадлежности к исследуемому упражнению l , а v_r – событие, представляющее собой прохождение последовательности из r состояний, используются элементы матриц M_l :

$$P(v_r | C_l) = \prod_{k=1}^{r-1} m_{s_{k+1}s_k,l}$$

Величины $\ln P(v_r | C_l)$ применяются в качестве *оценок правдоподобия* прохождения последовательности из r состояний при условии принадлежности к исследуемому упражнению l . Использование оценок правдоподобия вместо соответствующих вероятностей при анализе динамики прохождения состояний модели обусловлено низкими порядками указанных вероятностей, которые неудобны для машинных вычислений.

Формирование матрицы взаимных расстояний в метрике правдоподобия в нотации графического языка G среды графического программирования LabVIEW представлено на рис. 2.

Пример практического применения: определение режима полета и квалификации пилота по данным видеоокулографии на основе сравнений оценок правдоподобия траекторий движения взгляда

Траектории движения взгляда измерялись в ходе экспериментов на универсальном стенде прототипирования кабины экипажа, разработанном во ФГУП «ГосНИИАС» [2]. В экспериментах принимала участие большая группа специалистов ФГУП «ГосНИИАС» и МГППУ. Режимы полета и квалификация пилотов определялась на основе сравнений оценок правдоподобия траекторий движения взгляда. Данные видеоокулографии регистрировались с помощью айтрекера *Gazepoint GP3* (Gazepoint Research Inc.), представленного

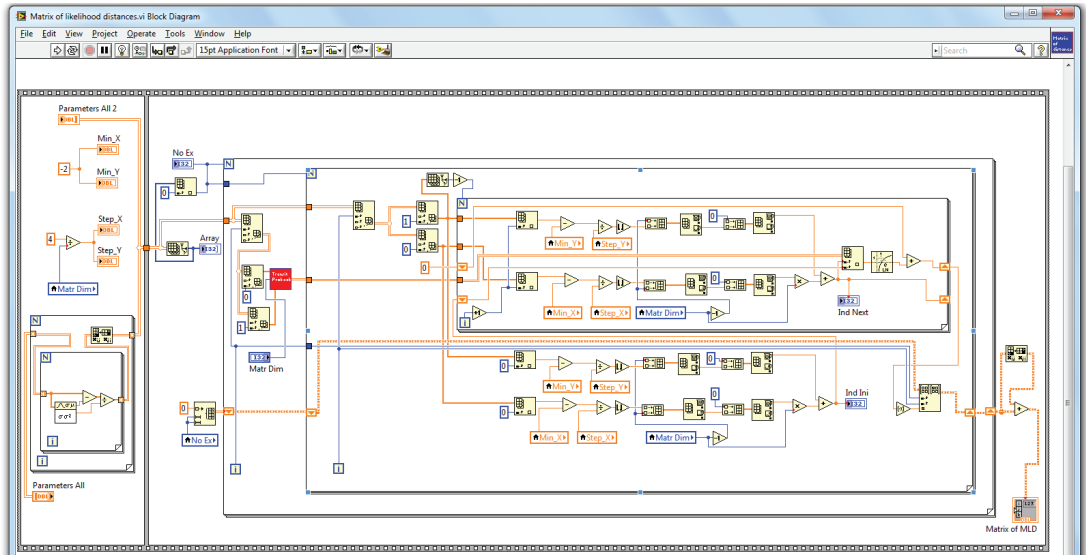


Рис. 2. Формирование матрицы взаимных расстояний в метрике правдоподобия в нотации графического языка G среды графического программирования LabVIEW

на рис. 3. Это устройство является бесконтактным техническим средством и позволяет исключить субъективную оценку показателей состояния пилота.



Рис. 3. Айтрекер Gazerpoint GP3 (Gazerpoint Research Inc.), с помощью которого регистрировались данные видеоокулографии

В процессе экспериментов регистрировались траектории движения взгляда на индикаторах на лобовом стекле (ИЛС). Содержание индикации адаптивно изменялось в зависимости от высоты полета при переходе через высоты 1500 ft и 100 ft, поэтому данные видеоокулографии сопоставлялись для упражнения «Посадка», включающего три фазы полета, представленные следующими диапазонами высот:

- более 1500 ft (снижение до 1500 ft);
- от 100 до 1500 ft (снижение после 1500 ft);
- менее 100 ft (собственно посадка).



Упражнения выполнялись двумя специалистами, имеющими навыки пилотирования, но разную квалификацию (один из них рассматривался как опытный, а второй — как неопытный пилот).

В качестве иллюстраций на рис. 4 представлены «тепловые» карты распределения внимания для различных режимов полетов и пилотов разной квалификации. Прямые качественные сравнения «тепловых» карт позволяют заключить, что нет оснований надеяться на выявление какой-либо значимой дискриминации между режимами полета и пилотами, опираясь только на данную форму представления ГДА.

Анализ ГДА пилотов выполнялся на основе сравнений траекторий движения взгляда в метрике правдоподобия с помощью инструментального средства *Intelligent System for Flight Analysis* (ISFA 3.0).

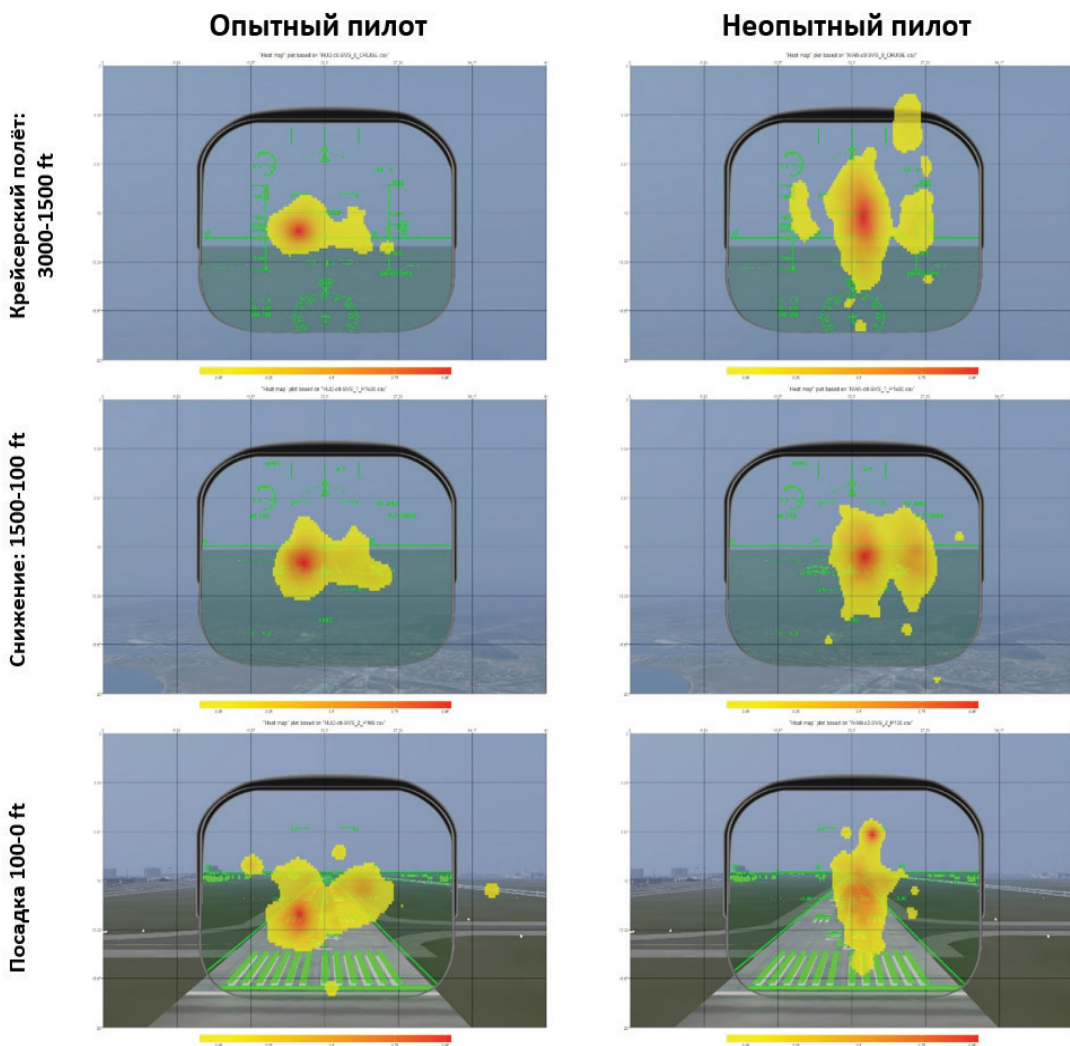


Рис. 4. «Тепловые» карты распределения внимания для различных режимов полетов и пилотов разной квалификации



Представленные в табл. 1 и 2 результаты предварительного дискриминантного анализа Фишера представлений траекторий движения взора в пространствах шкалирования с проверкой гипотез о незначимости отличий траекторий движения взора на различных фазах полета и для различных пилотов с вычислением *F*-статистик выявили, что:

— отсутствует значимая дискриминация между опытным и неопытным пилотами при полете выше 1500 ft и ниже 100 ft;

— для обоих пилотов имеет место высокосignificant дискриминация между разными фазами полета;

— при полете на высотах от 1500 до 100 ft имеет место высокосignificant дискриминация между опытным и неопытным пилотами.

Поэтому при последующем анализе сравнивались четыре группы траекторий движения взора:

— оба пилота при полете на высотах выше 1500 ft;

— опытный пилот при полете на высотах от 1500 до 100 ft;

— неопытный пилот при полете на высотах от 1500 до 100 ft;

— оба пилота при полете на высотах ниже 100 ft.

Таблица 1

Результаты предварительного дискриминантного анализа Фишера представлений траекторий движения взора в пространствах шкалирования: проверка гипотез о незначимости отличий траекторий движения взора на различных фазах полета и для различных пилотов с вычислением *F*-статистик (*F*-статистики)

<i>F</i> -статистики (df = 2,16)	Неопытный: снижение до 1500 ft	Опытный: снижение до 1500 ft	Неопытный: снижение после 1500 ft	Опытный: снижение после 1500 ft	Неопытный: посадка	Опытный: посадка
Неопытный: снижение до 1500 ft		0,109	7,614	21,602	4,121	5,342
Опытный: снижение до 1500 ft	0,109		8,133	27,583	5,334	7,000
Неопытный: снижение после 1500 ft	7,614	8,133		15,338	25,337	29,037
Опытный: снижение после 1500 ft	21,602	27,583	15,338		55,494	59,916
Неопытный: посадка	4,121	5,334	25,337	55,494		0,128
Опытный: посадка	5,342	7,000	29,037	59,916	0,128	

Таблица 2

Результаты предварительного дискриминантного анализа Фишера представлений траекторий движения взора в пространствах шкалирования: проверка гипотез о незначимости отличий траекторий движения взора на различных фазах полета и для различных пилотов с вычислением *F*-статистик (*p*-значения)

<i>p</i> -значения	Неопытный: снижение до 1500 ft	Опытный: снижение до 1500 ft	Неопытный: снижение после 1500 ft	Опытный: снижение после 1500 ft	Неопытный: посадка	Опытный: посадка
Неопытный: снижение до 1500 ft		0,898	0,005	0,000	0,036	0,017
Опытный: снижение до 1500 ft	0,898		0,004	0,000	0,017	0,007
Неопытный: снижение после 1500 ft	0,005	0,004		0,000	0,000	0,000
Опытный: снижение после 1500 ft	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000
Неопытный: посадка	0,036	0,017	0,000	0,000		0,881
Опытный: посадка	0,017	0,007	0,000	0,000	0,881	

После ввода в специализированную базу данных фрагментов ГДА для различных режимов полета и пилотов была вычислена матрица взаимных расстояний между траекториями движения взора в метрике правдоподобия, представленная в цветовой шкале на рис. 5.

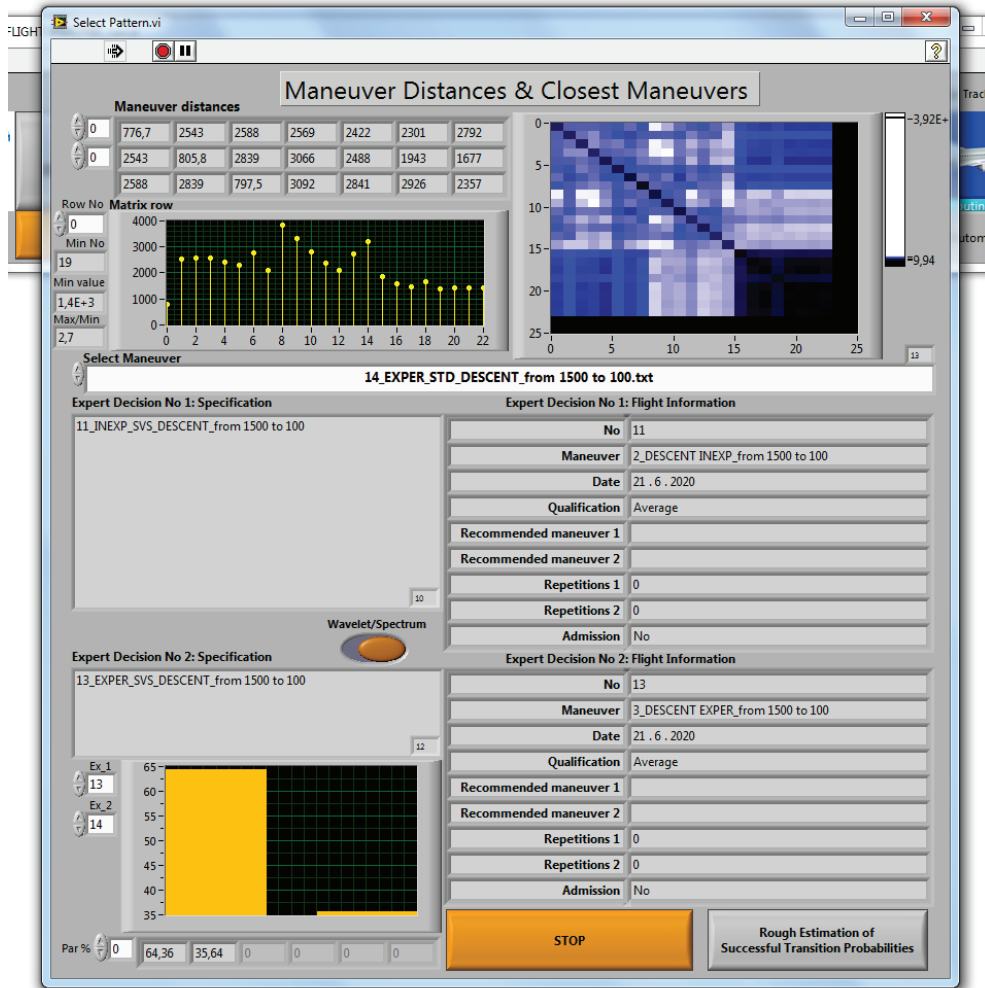


Рис. 5. Результаты вычисления матрицы взаимных расстояний между траекториями движения взгляда в метрике правдоподобия вместе с сопутствующей информацией (матрица представлена в цветовой шкале)

В результате многомерного шкалирования исследуемые фрагменты ГДА были упорядочены в двумерном пространстве, демонстрируя высокую степень дискриминации (рис. 6).

В качестве иллюстраций, на рис. 7 и 8 соответственно, приведено сопоставление «сырых» (т. е. необработанных) траекторий движения взгляда опытного пилота при полете на высотах выше 1500 ft и ниже 100 ft и опытного и неопытного пилотов при полете на высотах от 1500 ft до 100 ft.

Дискриминантный анализ, выполненный на основе подходов, применяемых в квантовых вычислениях (рис. 9), привел к 5 ошибкам, что составляет 22% от объема выборки и позволяет говорить о значимом отличии результата распознавания указанных выше четырех групп траекторий движения взгляда от равномерного распределения по критерию Пирсона ($\chi^2_1 = 7,35; p < 0,007$).

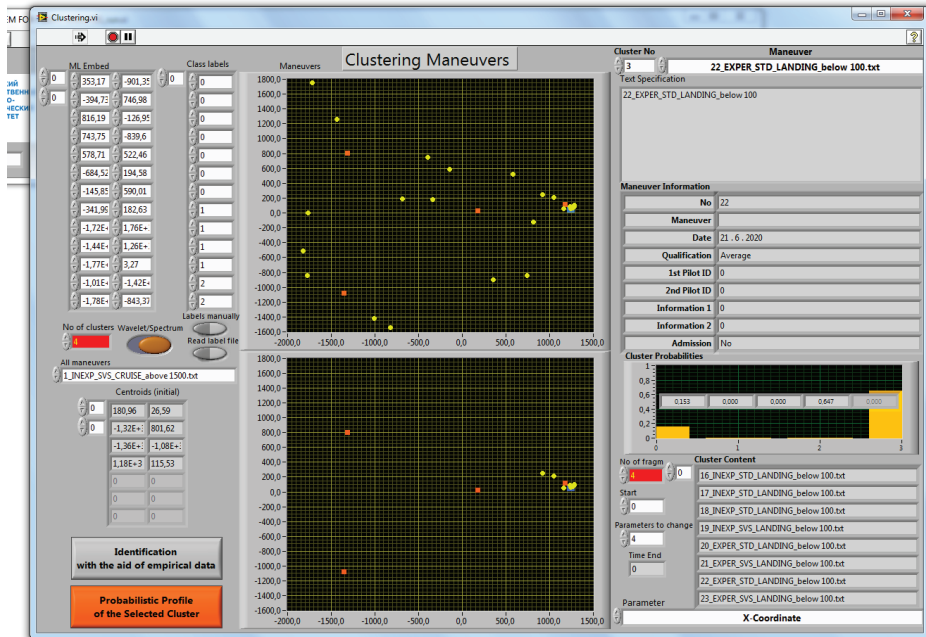


Рис. 6. Исследуемые фрагменты ГДА, упорядоченные в двумерном пространстве шкалирования

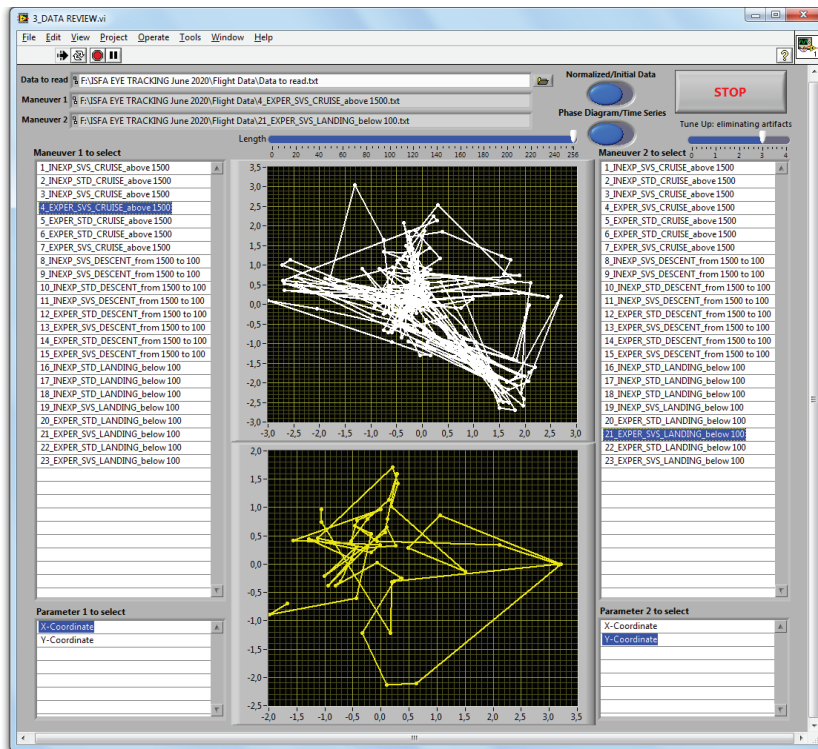


Рис. 7. Сопоставление «сырых» (необработанных) траекторий движения взгляда опытного пилота при полете на высотах выше 1500 ft и ниже 100 ft

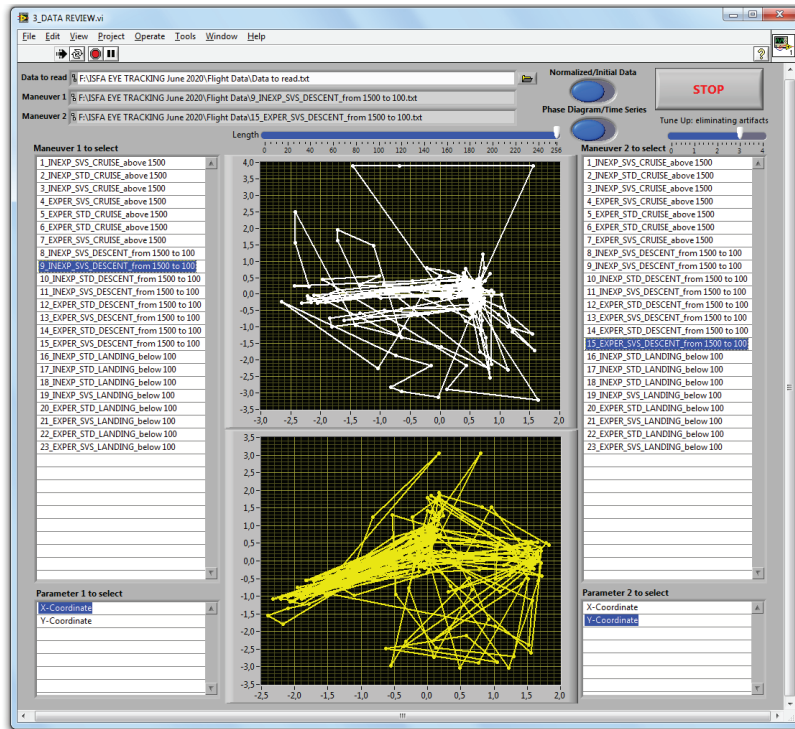


Рис. 8. Сопоставление «сырых» (необработанных) траекторий движения зрения опытного и неопытного пилотов при полете на высотах от 1500 ft до 100 ft

Классический дискриминантный анализ распределения исследуемых фрагментов ГДА в пространстве шкалирования привел к такому же результату: 5 ошибок (22% от объема выборки). Дискриминация фрагментов ГДА является статистически высокозначимой (статистика Уилкса=0,04; ассоциированная статистика $F(6,36)=22,83; p<0,0001$).

Таким образом, рассмотренный пример позволяет говорить о возможности:

– значимой дискриминации траекторий движения зрения пилотов на разных фазах полета;

– значимой дискриминации траекторий движения зрения опытных и неопытных пилотов на определенных фазах полета, что свидетельствует о перспективности применения представленного подхода для анализа данных видеоокулографии, особенно когда классические методы не позволяют получать полезные выводы.

В перспективе, выявленная значимая дискриминация траекторий движения зрения позволит идентифицировать как выполняемые режимы полёта, так и уровень подготовки пилотов по данным их глазодвигательной активности в автоматическом режиме в реальном времени. Очевидно, что область применения рассмотренного подхода не ограничивается авиационными приложениями и может быть распространена на близкие по содержанию задачи.

Основные результаты и выводы

Разработаны математические модели и методы оценки уровня подготовки экипажа на основе данных видеоокулографии, которые опираются на сравнения исследуемых фрагмен-

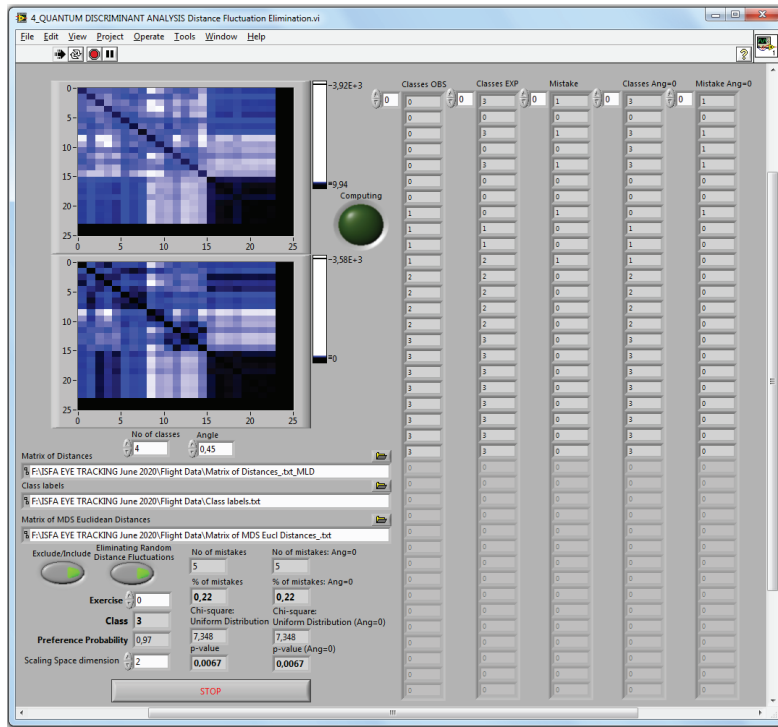


Рис. 9. Панель с результатами дискриминантного анализа, выполненного на основе подходов, применяемых в квантовых вычислениях

тов глазодвигательной активности пилотов с сопоставимыми паттернами данных видеоокулографии различных типов и качества исполнения, содержащимися в заранее сформированной специализированной базе данных. Для получения оценок применяется сложная комбинация методов анализа случайных процессов и многомерного статистического анализа.

Рассмотренный пример определения режима полета и квалификации пилота по данным видеоокулографии позволяет говорить о возможности:

- значимой дискриминации траекторий движения взгляда пилотов на разных фазах полета;
- значимой дискриминации траекторий движения взгляда опытных и неопытных пилотов на определенных фазах полета, что свидетельствует о перспективности применения представленного подхода для анализа данных видеоокулографии, особенно когда классические методы не позволяют получать полезные результаты.

В перспективе, выявленная значимая дискриминация траекторий движения взгляда позволит идентифицировать как выполняемые режимы полёта, так и уровень подготовки пилотов по данным их глазодвигательной активности в автоматическом режиме в реальном времени.

Полученные результаты являются существенным развитием средств прогнозирования рисков и выявления факторов, способствующих возникновению опасных лётных ситуаций, в том числе в режиме реального времени, и могут применяться:

- для оценки работы экипажей, включая контроль качества их обучения;
- поддержки формирования инструкторских оценок;



- обеспечения современных форм адаптивного обучения экипажей;
- сравнения различных вариантов форматов системы экранной индикации и пультов управления самолётными системами в кабине экипажа;
- оптимизации компоновки индикаторов и пультов кабины экипажа ВС с учетом ГДА;
- оценки влияния информационно-управляющего поля кабины экипажа ВС и условий полета на риски возникновения авиационных инцидентов;
- сравнения различных средств и программ обучения лётного состава при проектировании современных летательных аппаратов.

Литература

1. *Барабанищikov В.А., Жегалло А.В.* Регистрация и анализ направленности взгляда человека. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2013. 316 с.
2. *Желтов С.Ю., Федосов Е.А., Чуянов Г.А., Златомрежеv В.И., Грешников И.И. и др.* Патент № 101331 Комплекс оборудования (стенд) прототипирования интерфейса кабины воздушного судна / Правообладатель ФГУП «ГосНИИАС» (Россия). Заявка № 2016500077; Заяв. 15.01.2016; Зарегистр. 15.12.2016. (РОСПАТЕНТ).
3. *Красильщиков М.Н., Евдокименков В.Н., Базлев Д.А.* Индивидуально-адаптированные бортовые системы контроля технического состояния самолета и поддержки управляющих действий летчика. М.: Изд-во МАИ, 2011. 438 с.
4. *Куравский Л.С., Юрьев Г.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660358 Intelligent System for Flight Analysis v1.0 (ISFA#1.0) / Правообладатели: Куравский Л.С., Юрьев Г.А. (Россия). Заявка № 2018617617; Заяв. 18.07.2018; Зарегистр. 22.08.2018.— (РОСПАТЕНТ).
5. Отчет о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка моделей рисков человеческого фактора и рекомендаций по созданию человеко-машинного интерфейса кабины экипажа воздушного судна» (промежуточный), этап 1, Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 21.10.2019г. № 075-11-2019-018, № госрегистрации RFMEFI62819X0014.
6. Отчет о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка моделей рисков человеческого фактора и рекомендаций по созданию человеко-машинного интерфейса кабины экипажа воздушного судна» (итоговый), этап 2, Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 21.10.2019г. № 075-11-2019-018, № госрегистрации RFMEFI62819X0014.
7. *Kuravsky L.S., Yuryev G.A.* A novel approach for recognizing abnormal activities of operators of complex technical systems: three non-standard metrics for comparing performance patterns [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET). 2020. 11 (4). P. 119–136, <http://www.iaeme.com/IJARET/issues.asp?JType=IJARET&VType=11&IType=4>. (Accessed 20.11.2020)
8. *Kuravsky L.S.* Discriminant Analysis Based on the Approaches of Quantum Computing // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 41. № 12. P. 2338–2344.
9. *Kuravsky L.S., Yuryev G.A.* The intelligent system to support condition monitoring for activities of operators of complex technical systems. In: Proc. 16th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management. Glasgow, UK, June 2019. 17 p. DOI: 10.1784/cm.2019.108
10. *Kuravsky L.S., Yuryev G.A.* Detecting Abnormal Activities of Operators of Complex Technical Systems and their Causes Basing on Wavelet Representations [Электронный ресурс] // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2019. 10(2). P. 724–742. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=2>
11. *Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I.* New approaches for assessing the activities of operators of complex technical systems // Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia). 2019. Vol. 12. № 4. P. 27–49. DOI:10.17759/exppsy.2019120403



12. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E. Assessing the Aircraft Crew Actions with the Aid of a Human Factor Risk Model // Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia). 2020. Vol. 13. № 2. P. 153–181. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130211>
13. Aircraft trajectory clustering techniques using circular statistics. Yellowstone Conference Center, Big Sky, Montana, 2016. IEEE.
14. Bastani V., Marcenaro L., Regazzoni C. Unsupervised trajectory pattern classification using hierarchical Dirichlet Process Mixture hidden Markov model // 2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP) / IEEE. 2014. P. 1–6.
15. Enriquez M. Identifying temporally persistent flows in the terminal airspace via spectral clustering // Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Chicago, IL, USA, 2013. June 10–13.
16. Enriquez M., Kurcz C. A Simple and Robust Flow Detection Algorithm Based on Spectral Clustering // International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Berkeley, CA, USA, 2012. May 22–25.
17. Faure C., Bardet J.M., Olteanu M., Lacaille J. Using Self-Organizing Maps for Clustering and Labelling Aircraft Engine Data Phases. In: WSOM (2017): 96–103.
18. Gaffney S., Smyth P. Joint probabilistic curve clustering and alignment // Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. Vol. 17. P. 473–480.
19. Gaffney S., Smyth P. Trajectory clustering with mixtures of regression models // Proceedings of the fifth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. 1999. P. 63–72.
20. Laxhammar R., Falkman G. Online learning and sequential anomaly detection in trajectories // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2014. Vol. 36. № 6. P. 1158–1173.
21. Rintoul M., Wilson A. Trajectory analysis via a geometric feature space approach // Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal. 2015.
22. Wilson A., Rintoul M., Valicka C. Exploratory Trajectory Clustering with Distance Geometry // International Conference on Augmented Cognition. 2016. Springer. P. 263–274.

References

1. Barabanshchikov V.A., Zhegallo A.V. Registratsiya i analiz napravlenosti vzora cheloveka [Registration and analysis of the orientation of a person's gaze]. Moscow Pub-l: Institute of psychology of the Russian Academy of Sciences, 2013, P. 316. (In Russ.).
2. Zheltov S.Yu., Fedosov E.A., Chuyanov G.A., Zlatomrejev V.I., Greshnikov I.I. etc. Patent No. 101331 Kompleks oborudovaniya (stend) prototipirovaniya interfeisa kabiny vozdušnogo sudna / Pravoobladateli FGUP GosNIAS (Russia). Zayavka 2016500077; Zayav. 15.01.2016; Zaregistr. 15.12.2016. (ROSPATENT). (In Russ.).
3. Krasil'shchikov M.N., Evdokimenkov V.N., Bazlev D.A. Individualno-adaptirovannye bortovye sistemy kontrolya tehnikeskogo sostoyaniya samlyota i podderzhki upravlyayushchikh deistviy letchika [Individually adapted on-Board systems for monitoring the technical condition of the aircraft and supporting the pilot's control actions]. Moscow: MAI Pub-l, 2011. P. 438. (In Russ.).
4. Kuravsky L.S., Yuriev G.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EHVM №2018660358 Intelligent System for Flight Analysis v1.0 (ISFA#1.0) / Pravoobladateli Kuravskii L.S., Yur'ev G.A. (Russia). Zayavka №2018617617; Zayav. 18.07.2018; Zaregistr. 22.08.2018. (ROSPATENT). (In Russ.).
5. Report on applied research on the topic “Development of human factor risk models and recommendations for creating a human-machine interface for the aircraft crew cabin” (intermediate), stage 1, State program of the Russian Federation “Development of the aviation industry for 2013-2025”, grant agreement dated 21.10.2019. No. 075-11-2019-018, state registration no. RFMEFI62819X0014. (In Russ.).
6. Report on applied research on the topic “Development of human factor risk models and recommendations for creating a human-machine interface for the aircraft crew cabin” (final), stage 2, State program of the Russian Federation “Development of the aviation industry for 2013–2025”, grant agreement dated 21.10.2019. No. 075-11-2019-018, state registration no. RFMEFI62819X0014. (In Russ.).
7. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. A novel approach for recognizing abnormal activities of operators of complex technical systems: three non-standard metrics for comparing performance patterns, International Journal of



- Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), 11 (4), 2020, pp. 119–136. <http://www.iaeme.com/IJARET/issues.asp?JType=IJARET&VType=11&IType=4>. (Accessed 20.11.2020)
8. Kuravsky L.S. Discriminant Analysis Based on the Approaches of Quantum Computing. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2020, Vol. 41, no. 12, pp. 2338–2344.
 9. Kuravsky L.S., Yuryev G.A. The intelligent system to support condition monitoring for activities of operators of complex technical systems. – In: Proc. 16th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, Glasgow, UK, June 2019. DOI: 10.1784/cm.2019.108 17 pp.
 10. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Detecting Abnormal Activities of Operators of Complex Technical Systems and their Causes Basing on Wavelet Representations. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(2), 2019, pp. 724–742. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=2>.
 11. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I. New approaches for assessing the activities of operators of complex technical systems. *Экспериментальная психология = Experimental psychology (Russia)*, 2019, vol. 12, no. 4, pp. 27–49. doi:10.17759/exppsy.2019120403.
 12. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E. Assessing the Aircraft Crew Actions with the Aid of a Human Factor Risk Model. *Экспериментальная психология = Experimental Psychology (Russia)*, 2020. Vol. 13, no. 2, pp. 153–181. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130211>.
 13. Aircraft trajectory clustering techniques using circular statistics. Yellowstone Conference Center, Big Sky, Montana, 2016. IEEE.
 14. Bastani V., Marcenaro L., Regazzoni C. Unsupervised trajectory pattern classification using hierarchical Dirichlet Process Mixture hidden Markov model // *2014 IEEE International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP) / IEEE. 2014*. Pp. 1–6.
 15. Enriquez M. Identifying temporally persistent flows in the terminal airspace via spectral clustering // Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2013) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Chicago, IL, USA: 2013. June 10-13.
 16. Enriquez M., Kurcz C. A Simple and Robust Flow Detection Algorithm Based on Spectral Clustering // International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT) / Federal Aviation Administration (FAA) and EUROCONTROL. Berkeley, CA, USA: 2012. May 22–25.
 17. Faure C., Bardet J.M., Olteanu M., Lacaille J. Using Self-Organizing Maps for Clustering and Labelling Aircraft Engine Data Phases. In: WSOM (2017): 96–103.
 18. Gaffney S., Smyth P. Joint probabilistic curve clustering and alignment // *In Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 17. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. Pp. 473–480.
 19. Gaffney S., Smyth P. Trajectory clustering with mixtures of regression models // Proceedings of the fifth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. 1999. Pp. 63–72.
 20. Laxhammar R., Falkman G. Online learning and sequential anomaly detection in trajectories // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2014. Vol. 36, no. 6. Pp. 1158–1173.
 21. Rintoul M., Wilson A. Trajectory analysis via a geometric feature space approach // *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*. 2015.
 22. Wilson A., Rintoul M., Valicka C. Exploratory Trajectory Clustering with Distance Geometry // International Conference on Augmented Cognition /Springer. 2016. Pp. 263–274.

Информация об авторах

Куравский Лев Семенович, доктор технических наук, профессор, декан факультета информационных технологий, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Юрьев Григорий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com



Златомрежев Валентин Игоревич, заведующий лабораторией, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФГУП «ГосНИИАС»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

Грешников Иван Игоревич, ведущий инженер, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФГУП «ГосНИИАС»), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru

Поляков Борислав Юрьевич, аспирант, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6457-9520>, e-mail: deslion@yandex.ru

Information about the authors

Lev S. Kuravsky, DSc (Engineering), Professor, Dean of Computer Science Faculty, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Grigory A. Yuryev, PhD (Physics and Mathematics), Associate professor, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

Valentin I. Zlatomrezhev, Head of Laboratory, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1776-6881>, e-mail: vizlatomr@2100.gosniias.ru

Ivan I. Greshnikov, Lead Engineer, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIAS), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru

Borislav Y. Polyakov, Graduate Student, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6457-9520>, e-mail: deslion@yandex.ru

Получена 20.11.2020

Принята в печать 01.03.2021

Received 20.11.2020

Accepted 01.03.2021