

Научная статья | Original paper

УДК 004.94:519.21:629.7.015

Диагностика состояний и типов деятельности пилотов на основе квантовых представлений

Л.С. Куравский¹ ✉, И.И. Грешников², В.А. Орищенко¹,
Н.Е. Юрьева¹, Г.А. Юрьев¹, И.А. Махортов^{1,2},
С.С. Ермаков¹, А.В. Соколов², А.А. Захарьчева^{3,4}

¹ Московский государственный психолого-педагогический университет,
Москва, Российская Федерация

² Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
(ФГУП ГосНИИАС), Москва, Российская Федерация

³ Авиакомпания «Сибирь», Новосибирск, Российская Федерация

⁴ Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации
Б.П. Бугаева, Ульяновск, Российская Федерация

✉ l.s.kuravsky@gmail.com

Резюме

Представлен новый метод определения состояний и типов деятельности пилотов с помощью квантовых представлений, построенных на основе анализа марковских процессов, представленных матрицами вероятностей переходов между выполняемыми типами элементарных операций и состояний воздушного судна (ВС). Полученные оценки позволяют говорить о существенных преимуществах нового подхода по сравнению с методом взаимных правдоподобий и методом стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС. Показано, что основной причиной, определяющей эти преимущества, является возможность анализа наблюдений во временной динамике, которая критически важна для корректной диагностики деятельности пилотов и игнорируется в случае традиционных подходов.

Ключевые слова: квантовые представления, марковские процессы, диагностика деятельности пилотов, психофизиологическое состояние

Для цитирования: Куравский, Л.С., Грешников, И.И., Орищенко, В.А., Юрьева, Н.Е., Юрьев, Г.А., Махортов, И.А., Ермаков, С.С., Соколов, А.В., Захарьчева, А.А. (2026). Диагностика состояний и типов деятельности пилотов на основе квантовых представлений. *Моделирование и анализ данных*, 16(2), 42–66. <https://doi.org/10.17759/mda.2026160202>



Diagnostics of pilot states and activity types basing on quantum representations

L.S. Kuravsky¹ ✉, I.I. Greshnikov², V.A. Orishchenko¹,
N.E. Yuryeva¹, G.A. Yuryev¹, I.A. Makhortov^{1, 2},
S.S. Ermakov¹, A.V. Sokolov², A.A. Zakharycheva^{3, 4}

¹ Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation

² State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation

³ “Siberia” Airlines, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russian Federation

✉ l.s.kuravsky@gmail.com

Abstract

A new method is presented for determining the states and types of pilot activities using quantum representations constructed based on the analysis of Markov processes represented by transition probability matrices between the performed types of elementary operations and aircraft states. The obtained estimates allow us to speak of significant advantages of the new approach compared to the method of mutual likelihoods and the method of stationary probability distributions of the repetition of types of elementary operations and aircraft states. It is shown that the main reason determining these advantages is the possibility of analyzing observations in temporal dynamics, which is critically important for the correct diagnostics of pilot activities and is ignored in the case of traditional approaches.

Keywords: quantum representations, Markov processes, pilot activity diagnostics, psychophysiological state

For citation: Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Orishchenko, V.A., Yuryeva, N.E., Yuryev, G.A., Makhortov, I.A., Ermakov, S.S., Sokolov, A.V., Zakharycheva, A.A. (2026). Diagnostics of pilot states and activity types basing on quantum representations. *Modelling and Data Analysis*, 16(2), 42–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2026160202>

Введение

В настоящее время в авиационных приложениях особую значимость приобрели задачи объективной количественной оценки уровня сформированности профессиональных навыков при подготовке пилотов. По данным последних лет, на каждый час полёта гражданского ВС приходится всего 5 минут ручного пилотирования, однако за это время происходит 67% лётных происшествий. Таким образом, цена недоработок в профессиональной подготовке экипажа очень высока.

Инструментарий, оценивающий уровень профессиональной подготовки, длительное время опирался на подход, называемый современной теорией тестирования,



и модель Г. Раша. Однако этот подход имеет ряд ограничений, включая статичность оценок, невозможность учёта времени выполнения заданий и необходимость предъявления большого числа заданий.

Поэтому был разработан новый подход (Куравский, 2017), формализующий представление диагностических процедур как идентифицируемых случайных марковских процессов с байесовскими оценками испытуемых. Позднее были разработаны методы и средства диагностики, обеспечивающие комбинацию анализа случайных процессов в пространстве вейвлет-коэффициентов и многомерного статистического анализа. На базе этого подхода создано инструментальное средство «The Intelligent System for Flight Analysis» (Куравский, Юрьева, Юрьев и др., 2021).

Нерешёнными остались проблемы, связанные с формализацией профессиональной деятельности пилотов, необходимостью накопления большого объёма эмпирических данных и разработкой математических методов, способных извлекать из данных больше полезной информации.

В 2022—2023 годах разработан прототип адаптивной системы с функцией интеллектуального помощника (Куравский, 2017), а также новый подход к решению диагностических задач путем свёртки прикладных марковских процессов в квантовые представления (Kuravsky, 2021; Kuravsky, 2022; Kuravsky, 2024). Преимуществом таких представлений является то, что число кубитов определяется числом кластеров состояний модели, которое кратно меньше числа состояний в исходном марковском процессе. Квантовые представления позволяют исследовать внутреннюю структуру наблюдаемого процесса в частотной области.

Указанный подход развит в работах (Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev and etc., 2024; Kuravsky, Greshnikov, Orishchenko, 2025; Kuravsky, Greshnikov, Yuryev, Zlatomrezhev, 2023; Kuravsky, Orishchenko, Greshnikov, 2026) и показал существенные преимущества по сравнению с альтернативными способами оценок. Необходимость применения квантовых представлений обусловлена тем, что они обеспечивают исследование наблюдений в процессе эволюции, а не всей выборки сразу, что критически важно при анализе деятельности пилотов «во временной развёртке».

Применяемые квантовые представления реализуются на классическом компьютере, возможность чего обосновывается теоремой Готтесмана–Книлла (Nielsen, Chuang, 2010).

Далее рассмотрены универсальный способ представления профессиональной деятельности пилотов в виде матриц вероятностей переходов между типами элементарных операций и состояний ВС и метод анализа этих матриц на основе квантовых представлений.

Новизна результатов обусловлена тем, что:

- учитываются дискретизованные параметры, характеризующие пространственное положение ВС, что делает представление деятельности пилотов и его анализ существенно более полным (ранее учитывались только показатели глазодвигательной активности, отражающие последовательность просмотра зон интереса на командно-пилотажных индикаторах и дискретизованные воздействия пилота на органы управления ВС (Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev and etc., 2024));



- сопоставление сравниваемых вариантов деятельности пилотов строится на основе техники проверки гипотез (Cramer, 1999; Lloyd (ред.), 1984; Rao (ред.), 1980—1999), принятой в математической статистике, и доводится до вероятностных оценок;
- преимущества нового подхода обосновываются сравнениями с альтернативными классическими методами — методом взаимных правдоподобий и методом стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС.

Основные компоненты метода квантовых представлений

Теоретические основы метода рассмотрены далее в разделе 3. Основные компоненты подхода приведены на рисунке 1. Последовательно вычисляются:

- кластеры состояний марковского процесса;
- траектории обхода кластеров;
- матрицы попарных сравнений траекторий в спектральной метрике;
- траектории обхода кластеров в пространстве шкалирования (Lloyd, 1984; Morrison, 1976);
- количественные отличия сравниваемых вариантов деятельности.
Выполняются следующие укрупнённые операции:
- многомерное шкалирование (Borg, Groenen, 2005; Cox, Cox, 2001; Lloyd (ред.), 1984; Morrison, 1976) типов элементарных операций и состояний ВС, учитываемых в матрице вероятностей переходов, для сравниваемых вариантов деятельности;
- имитационное моделирование переходов между состояниями марковского процесса;
- попарные сравнения траекторий обхода кластеров в спектральной метрике;
- многомерное шкалирование траекторий обхода кластеров состояний, учитываемых в матрице попарных сравнений траекторий обхода кластеров состояний в спектральной метрике;
- вычисление статистик Уилкса и F-отношений для сравниваемых множеств траекторий обхода кластеров состояний.

Теоретические основы метода квантовых представлений

Основное преимущество применения метода квантовых представлений для решения диагностических задач обусловлено тем, что они рассматривают наблюдения во временной динамике, которая игнорируется в случае классических подходов, когда анализируются «статические» вероятностные распределения без учёта «временной развёртки» появления эмпирических данных. Как показали проведённые исследования, для решения диагностических задач, связанных с оценкой состояния и профессиональной деятельности пилотов воздушных судов, учёт временного



фактора оказывается критически важным (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Kozurev и др., 2024). Применяемый подход, при котором методом квантового правдоподобия идентифицируются частоты эволюции представляющих кубитов, а моделируемые варианты динамики наблюдаемого процесса сравниваются в спектральной метрике, полученной на основе такой идентификации, фактически аналогичен спектральному анализу случайных процессов, построенному на основе преобразования Фурье. В обоих случаях анализ во временной области заменяется анализом в частотной области. Квантовые представления лучше согласуются с процессом эмпирических исследований, чем традиционные вероятностные характеристики.

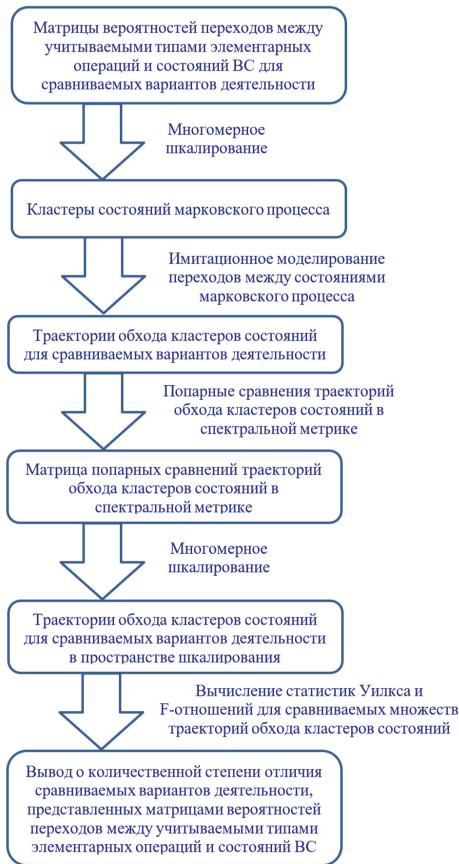


Рис. 1. Основные компоненты метода определения состояний и типов деятельности пилотов на основе квантовых представлений

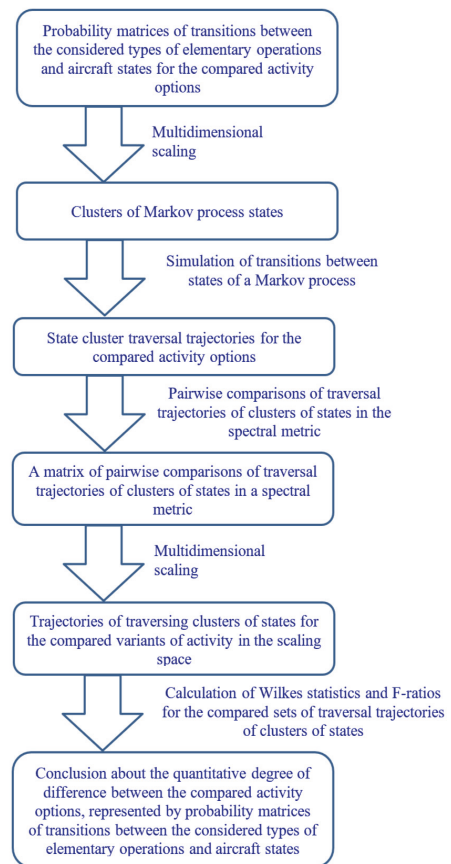


Fig. 1. The main components of the method for determining the states and types of pilot activity basing on quantum representations



В случае метода квантовых представлений диагностика пилотов привязывается к количественно измеримым характеристикам их деятельности. В результате его применения выявляется относительно небольшое количество определяемых экспертами классифицируемых типов недопустимых действий или поведения, представляющих практический интерес. Подходы, не использующие сравнения с накопленными эмпирическими данными, в случае диагностической задачи не имеют перспективы из-за отсутствия полной и адекватной наблюдениям формализованной модели поведения пилота, опирающейся на выявленные в результате научных исследований количественные психологические и психофизиологические закономерности.

Анализ деятельности пилотов строится на основе наблюдаемых протоколов деятельности пилота, представляющих последовательности выполняемых элементарных операций и состояний ВС. Эти протоколы преобразуются в матрицы вероятностей переходов между типами элементарных операций и состояний ВС, размер которых определяется числом учитываемых типов операций. Полученные матрицы вероятностей переходов представляют различные варианты деятельности пилотов, позволяя рассматривать их в процессе анализа как марковские процессы с дискретными состояниями и дискретным временем (или марковские цепи), состояниями которых являются учитываемые в протоколах типы элементарных операций и состояний ВС. Различия в типах элементарных операций и состояний ВС несущественны, поскольку при построении диагностических выводов используются только вероятностные связи между ними. В ряде прикладных задач для получения необходимых диагностических выводов достаточно учитывать только дискретизованные воздействия на органы управления и состояния ВС.

Эффективность решения прикладных задач определяется степенью детализации учитываемых элементарных операций, конкретизирующих адаптацию модели к предметной области.

Учитывая эффективность рассматриваемого подхода (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Kuravsky, 2021; Kuravsky, 2022; Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev и др., 2024; Kuravsky, Greshnikov, Orishchenko, 2025; Kuravsky, Greshnikov, Yuryev, Zlatomrezhev, 2023), включающего квантовый спектральный анализ и квантовую фильтрацию, информации, заключённой в матрицах вероятностей переходов между типами элементарных операций и состояний ВС, как правило, достаточно для дискриминации различных состояний и типов поведения пилотов.

Представление деятельности пилота с помощью матриц вероятностей переходов между элементарными операциями характеризуется простотой построения представления деятельности по данным наблюдений, доступностью и разумным объёмом необходимых измерений, хорошей дискриминацией представляющих интерес состояний и типов поведения пилотов.

Анализ деятельности пилотов на основе протоколов деятельности опирается на сравнения матриц вероятностей переходов между элементарными операциями для исследуемых паттернов деятельности или поведения с релевантными матрицами, построенными для накопленных в результате экспериментов данных, представляющих



распознаваемые ситуации и имеющих известную интерпретацию (Куравский, Козырев, Грешников, 2024; Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev and etc., 2024; Kuravsky, Greshnikov, Orishchenko, 2025). Эти сравнения опираются на результаты квантового спектрального анализа, обеспечивающего количественные сопоставления степени близости в спектральной метрике характеристик скрытых периодически выполняемых типовых элементарных операций и их количеств.

Согласно одному из постулатов квантовой механики, наблюдаемые (измеряемые) значения могут рассматриваться как собственные значения некоторого эрмитова оператора в гильбертовом пространстве (Petz, 2008). Этот оператор представляет гамильтониан H формальной квантовой системы, который можно представить как $H = EDE^+$, где D — диагональная матрица, на диагонали которой стоят наблюдаемые («измеряемые») вещественные значения; E — комплекснозначная квадратная матрица, столбцами которой являются вектора, образующие ортонормированный базис; E^+ — матрица, эрмитово сопряжённая к E . Выбор такого ортонормированного базиса является свободным. Столбцы матрицы E являются собственными векторами гамильтониана H , которые фактически задают допустимые варианты этого оператора и определяются удобством проведения «измерений». Выбор данного базиса определяется «наблюдателем» квантовой системы. «Измеряемые» значения, содержащиеся на диагонали матрицы D , и характеристики «наблюдателя», заданные матрицей E , определяют гамильтониан H наблюдаемой квантовой системы. Количество измеряемых значений является произвольным, но конечным. Это позволяет говорить о квантовых представлениях наблюдаемой системы с помощью *кудитов*, имеющих — в отличие от кубитов — более двух наблюдаемых состояний.

Если задан гамильтониан H , то унитарный оператор эволюции квантовой системы $U(t)$ есть решение уравнения Шрёдингера $\frac{d}{dt}U(t) = -iHU(t)$, записанного в операторной форме:

$$U(t) = e^{-iHt}.$$

Указанная здесь экспонента может рассматриваться как обозначение сходящейся к пределу суммы известного ряда:

$$e^{-iHt} = I - iHt + \frac{(-iHt)^2}{2!} + \dots + \frac{(-iHt)^k}{k!} + o(t^k).$$

В вычислительном отношении такой способ описания эволюции системы неудобен, поскольку требует суммирования медленно сходящегося ряда. Более удобным для анализа и расчётов является избыточное квантовое представление (Kuravsky, 2024), где каждое наблюдаемое значение описывается одним кубитом, состояния которого выражают факт появления или отсутствия данного значения при наблюдениях. Число кубитов равно числу возможных наблюдаемых значений. Вероятностная структура, представляемая кубитами, описывает динамику пребывания в нескольких



кластерах состояний, причем рассматриваемый процесс в любой момент времени находится в одном и только одном из M рассматриваемых кластеров. Амплитуды вероятностей кубитов «запутываются по измерениям» (*entangling by measuring*) по схеме «One-vs-Rest» (Kuravsky, 2021; Kuravsky, 2022; Kuravsky, 2024).

Марковские процессы, представляющие деятельность пилотов и состояние ВС, заменяются наборами из M кубитов $\{|q_k\rangle_{k=0}^{M-1}$, число которых определяется количеством кластеров, по которым распределены состояния этих процессов. *Кубитовые представления* используются для представления переходов между кластерами состояний, число которых значительно меньше числа состояний исходных марковских процессов, что обеспечивает понижение размерности задачи (Kuravsky, 2024), что обусловлено тем, что число кубитов кратно меньше числа состояний в исходном процессе. Кластеры состояний определяются по матрицам вероятностей переходов между состояниями по результатам процедуры многомерного шкалирования, в результате которой в пространстве шкалирования ближе друг к другу располагаются те пары состояний марковской модели, которые имеют большие вероятности взаимных переходов.

Пребывание марковского процесса в определённом кластере состояний есть наблюдаемая величина, принимающая следующие значения: 1 , если марковский процесс находится внутри заданного кластера состояний, и -1 , если марковский процесс находится вне заданного кластера состояний.

Пребывание в кластере состояний k ($k = 0, \dots, M-1$) представляется кубитом $|q_k(t) = A_k(t)|a_k + B_k(t)|b_k$, где t — время; $|a_k$ и $|b_k$ образуют базис, элементы которого становятся результатами наблюдений за системой кубитов; $A_k(t), B_k(t) \in \mathbb{C}$ (\mathbb{C} — множество комплексных чисел); $|A_k(t)|^2 + |B_k(t)|^2 = 1$, где $|A_k(t)|^2$ есть вероятность пребывания в кластере состояний k согласно правилу Борна; $|B_k(t)|^2$, соответственно, есть вероятность отсутствия в кластере состояний k (что интерпретируется как пребывание в любом другом доступном кластере системы $j \neq k$, который не совпадает с кластером i).

Согласно интерпретации фон Неймана (von Neumann, 1955), определяются *преобразования нормализации* N_k , обеспечивающие выполнение заданных условий для $A_k(t)$ и $B_k(t)$ ($k = 0, \dots, M-1$):

$$N_k(A_k(t)|a_k + B_k(t)|b_k) = \frac{A_k(t)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{M-1} |A_j(t)|^2}} |a_k + \text{sign}(B_k(t)) \sqrt{1 - \frac{|A_k(t)|^2}{\sum_{j=0}^{M-1} |A_j(t)|^2}} |b_k.$$

Эволюция каждого кубита $|q_k(t)$ в *закрытом режиме* (в отсутствие наблюдений) описывается *унитарным оператором эволюции* $U_k(t_0, t)$ k -й квантовой системы:

$$|q_k(t_0 + t) = U_k(t_0, t) |q_k(t_0),$$

где $|q_k(t_0)$ — текущее состояние исследуемой замкнутой системы в момент времени t_0 , $|q_k(t_0 + t)$ — состояние той же замкнутой системы в момент времени $t_0 + t$.



Оператор $U_k(t_0, \Delta t)$ унитарной эволюции, отвечающий за эволюцию в течение малого интервала времени Δt (от состояния $|q_k(t_0)\rangle$ в момент времени t_0 до состояния $|q_k(t_0 + \Delta t)\rangle$ в момент времени $t_0 + \Delta t$) представляется как $I - i\Delta t H_k + o(\Delta t)$, где H_k — гамильтониан k -й квантовой системы; I — тождественный оператор, что вытекает из непрерывности оператора $U_k(t_0, \Delta t)$ с главной линейной частью приращения $-i\Delta t H_k$.

Если гамильтониан H_k известен, то поведение k -го исследуемого кубита определяется решением записанного для оператора U_k уравнения Шрёдингера, которое выводится, используя непрерывность и унитарность оператора эволюции:

$$\frac{d}{dt}U_k(t_0, t) = -iH_k U_k(t_0, t).$$

Решение этого уравнения известно: $U_k(t_0, t) = U_k(t_0, 0)e^{-iH_k t}$.

В качестве оператора унитарной эволюции допустим оператор вращения (Kuravsky, 2021; Kuravsky, 2022; Kuravsky, 2024):

$$U_k(t_0, t) = U_k(t_0, 0) \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t \\ \sin t & \cos t \end{pmatrix}.$$

Скорость эволюции различных кубитов может различаться. Однако в одной системе все кубиты должны эволюционировать в одном и том же масштабе времени. Поэтому для каждого кубита $|q_k(t)\rangle$ определяется частотный параметр θ_k . Оператор вращения при этом принимает вид:

$$U_k(t_0, 0) \begin{pmatrix} \cos(2\pi\theta_k t) & -\sin(2\pi\theta_k t) \\ \sin(2\pi\theta_k t) & \cos(2\pi\theta_k t) \end{pmatrix},$$

где t — общее время; θ_k — частота вращения кубита. Представленная таким образом эволюция в рассматриваемой задаче выражает скрытую периодичность нахождения в кластерах состояний в течение периода наблюдения.

Идентификация параметров представлений кубитов и сопутствующие ей проблемы представлены в работах (Kuravsky, 2024; Kuravsky, Orishchenko, Greshnikov, 2026).

Под спектром исследуемого процесса деятельности пилотов понимаются частоты $\{\theta_k^*\}_{k=0, \dots, M-1}$ и наблюдаемые количества $\{F_k\}_{k=0, \dots, M-1}$ попаданий в кластеры состояний $k = 0, \dots, M-1$ в моменты времени $\{t_j\}_{j=1, 2, \dots, N}$, называемые далее амплитудами $\{L_k\}_{k=0, \dots, M-1}$. При анализе поведения квантовой системы определяются скрытые периодичности попаданий в эти кластеры в течение периода наблюдений. Спектральная метрика показала свою эффективность при сравнении спектров процессов для пар вариантов поведения системы:

$$w_{uv} = M - Z_{uv} e^{-\hat{a} \sum_{k=0}^{M-1} (L_{u,k} - L_{v,k})^2},$$



где u и $v(u, v = 1, \dots, Z)$ — пара индексов сравниваемых Z процессов; w_{uv} — расстояние между процессами u и v ; Z_{uv} — количество совпадающих частот $\{\theta_{u,k}^*\}_{k=0, \dots, M-1}$ и $\{\theta_{v,k}^*\}_{k=0, \dots, M-1}$ с одинаковыми индексами k для сравниваемых процессов u и v (частоты $\theta_{u,k}^*$ и $\theta_{v,k}^*$ с одинаковым индексом k считаются совпадающими, если модуль их разности меньше заданной точности оценки $\Delta\theta$, то есть $|\theta_{u,k}^* - \theta_{v,k}^*| \leq \Delta\theta$); $L_{u,k}$ и $L_{v,k}$ — амплитуды k -го кубита для процессов u и v соответственно; $\beta \geq 0$ — эмпирический коэффициент. Указанный показатель экспоненты принимает наибольшее значение, если $L_{u,k} = L_{v,k}$ для всех k , при этом расстояние w_{uv} принимает наименьшее значение.

Представление деятельности пилотов с помощью матриц вероятностей переходов между элементарными операциями даёт возможность, не проводя трудоёмкие эксперименты, генерировать путём имитационного моделирования выборки траекторий прохождения кластеров состояний, формирующих квантовые представления. Для этих выборок в *спектральной метрике* вычисляются матрицы взаимных расстояний, после чего многомерное шкалирование позволяет представить указанные траектории в виде точек в пространстве шкалирования заданной размерности.

Пары множеств точек в пространстве шкалирования, вычисленные для сравниваемых матриц вероятностей переходов между элементарными операциями, в свою очередь, позволяют вычислять попарные *статистики Уилкса*, или *L-статистики*. Эти статистики используются для количественной оценки качества дискриминации для указанных множеств точек. Значения этих статистик лежат в интервале от 0 до 1, причём значения, близкие к нулю, указывают на хорошую дискриминацию, а близкие к единице — на фактическое отсутствие дискриминации. Полученные оценки являются «отфильтрованными» от искажений, возникающих вследствие ошибок в выборочных оценках элементов матриц вероятностей переходов.

Статистики Уилкса $A_{\lambda\mu}$ для пар траекторий прохождения кластеров состояний λ и μ вычисляются следующим образом:

$$A_{\lambda\mu} = \det(\mathbf{Y}_{\lambda\mu}) / \det(\mathbf{\Omega}_{\lambda\mu})$$

где $\mathbf{Y}_{\mu} = \gamma_{\mu,ij}$ — матрица внутригрупповых ковариаций, $\mathbf{\Omega}_{\mu} = \omega_{\mu,ij}$ — общая матрица ковариаций, $\gamma_{\mu,ij} = \sum_{\alpha=1}^{\Xi} \sum_{\beta=1}^{\eta_{\alpha}} (\zeta_{\mu,i\alpha\beta} - \zeta_{\mu,i\alpha^*}) (\zeta_{\mu,j\alpha\beta} - \zeta_{\mu,j\alpha^*})$, $\omega_{\mu,ij} = \sum_{\alpha=1}^{\Xi} \sum_{\beta=1}^{\eta_{\alpha}} (\zeta_{\mu,i\alpha\beta} - \zeta_{\mu,i^{**}}) (\zeta_{\mu,j\alpha\beta} - \zeta_{\mu,j^{**}})$, $\zeta_{\mu,l\alpha\beta}$ — значение переменной $\zeta_{\mu,l}$ для β -й сгенерированной траектории α -го варианта, $l \in \{i, j\}$, $\zeta_{\mu,l^{**}}$ — среднее значение переменной $\zeta_{\mu,l}$ по всем вариантам траекторий, $\zeta_{\mu,i\alpha^*}$ и $\zeta_{\mu,j\alpha^*}$ — средние значения переменных $\zeta_{\mu,i}$ и $\zeta_{\mu,j}$ по всем сгенерированным траекториям α -го варианта, $\zeta_{\mu,i}$ и $\zeta_{\mu,j}$ — координаты точек, представляющих сгенерированные траектории в пространстве шкалирования, η_{α} — число сгенерированных траекторий, относящихся к α -му варианту, Ξ — число вариантов траекторий. В рассматриваемом случае $\Xi = 2$.

Для получения нормированных оценок с понятной интерпретацией полученные при попарных сравнениях значения *L-статистик Уилкса* пересчитываются по методу



Рао (Rao, 1973; Rao (ред.), 1980—1999) в значения F -статистик (F -отношений), распределения которых хорошо изучены:

$$F(n - N - m, N - 1) = \frac{n - N - m}{N - 1} \frac{1 - \Lambda}{\Lambda},$$

где n — общее число наблюдений, $N = 2$ — число сравниваемых матриц вероятностей переходов, $m = 2$ — размерность пространства шкалирования. p -значения, соответствующие этим статистикам, рассматриваются как **интегральные результаты попарного сравнения деятельности пилотов**. Как вероятности, они лежат в диапазоне от 0 до 1, причём 1 соответствует **идеальному соответствию**, а 0 — полному **отсутствию взаимодействия**.

Допустим альтернативный подход, опирающийся на оценки взаимных правдоподобий, построенные с использованием матриц вероятностей переходов, однако, как показано в разделе 6.1 и работах (Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev and etc., 2024), этот способ решения существенно уступает по эффективности и качеству получаемых результатов методу квантовых представлений.

Определение типов состояний и деятельности пилотов по результатам выполнения посадки ВС

Деятельность пилотов представлялась протоколами элементарных операций и состояний ВС, сформированных по 40 регистрируемым параметрам, которые включали: показатели глаздвигательной активности, отражающие последовательность просмотра зон интереса на командно-пилотажных индикаторах (Барабанщиков, Жегалло, 2013), дискретизованные воздействия пилота на органы управления ВС, последовательность изменения дискретизованных параметров, характеризующих пространственное положение ВС.

Оценка качества пилотирования и состояния пилотов проводилась путём сравнения с заранее подготовленными паттернами (эталонными вариантами) выполнения лётных упражнений, для которых указанные оценки были достоверно получены как экспертами, так и с помощью релевантного тестирования. Эти оценки используются как атрибуты при выборе диагностических решений.

Диагностическое решение принималось по атрибутам паттерна, наиболее близко к исследуемому фрагменту полёта, а именно: эти атрибуты приписывались исследуемому фрагменту полёта. Как указано выше, и паттерны, и исследуемый фрагмент полёта при сравнениях представлялись матрицами вероятностей переходов между учитываемыми типами элементарных операций и состояний ВС.

В качестве паттернов для сравнения использовались 4 варианта посадки ВС на комплексном демонстраторе технологий интеллектуального «виртуального второго пилота», выполненные опытным пилотом авиакомпании «Сибирь», ранее



работавшим пилотом-инструктором в Ульяновском институте гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева (рисунок 1):

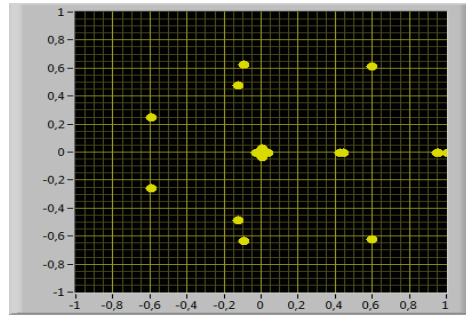
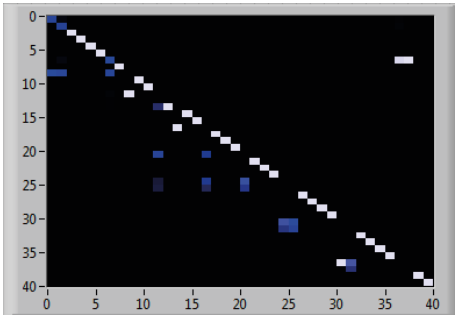
- посадка с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса;
- посадка с некорректностью первого типа;
- посадка с некорректностью второго типа;
- посадка с проблемой психофизиологического типа (очень высокий уровень усталости по самооценке).



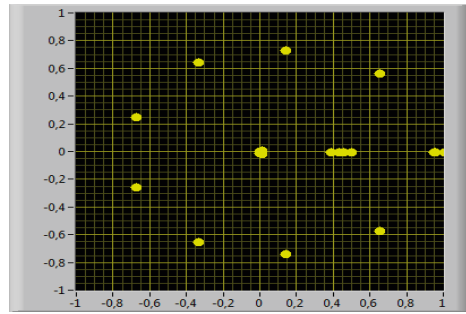
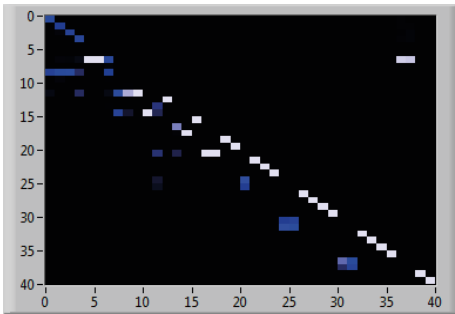
Рис. 1. Эксперименты на комплексном демонстраторе технологий интеллектуального «виртуального второго пилота»

Fig. 1. Experiments on a comprehensive technology demonstrator for an intelligent “virtual co-pilot”

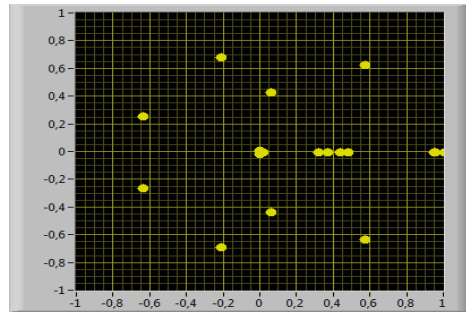
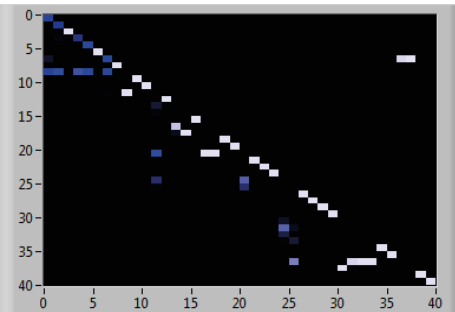
Соответствующие указанным лётным манёврам матрицы вероятностей переходов в цветовой шкале вместе со спектральными портретами, представленными собственными значениями этих матриц на комплексной плоскости, показаны на рисунке 2.



a



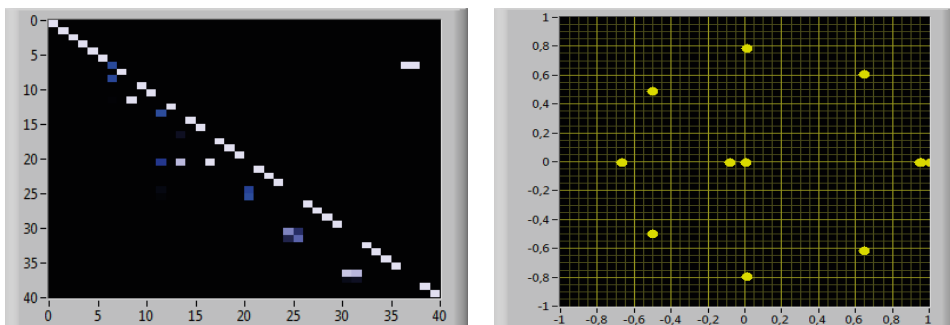
b



c

Рис. 2. Матрицы вероятностей переходов между учитываемыми типами элементарных операций и состояний ВС в цветовой шкале вместе со спектральными портретами, представленными собственными значениями этих матриц на комплексной плоскости для: (а) посадки с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса; (б) посадки с некорректностью первого типа; (с) посадки с некорректностью второго типа

Fig. 2. Probability matrices of transitions between the considered types of elementary operations and aircraft conditions in a color scale, together with spectral portraits represented by the eigenvalues of these matrices on the complex plane for: (a) landing with high piloting quality, low effort on the part of the pilot and low stress; (b) landings with an incorrectness of the first type; (c) landings with an incorrectness of the second type



d

Рис. 2. Матрицы вероятностей переходов между учитываемыми типами элементарных операций и состояний ВС в цветовой шкале вместе со спектральными портретами, представленными собственными значениями этих матриц на комплексной плоскости для: (d) посадки с проблемой психофизиологического типа (очень высокий уровень усталости по самооценке)

Fig. 2. Probability matrices of transitions between the considered types of elementary operations and aircraft conditions in a color scale, together with spectral portraits represented by the eigenvalues of these matrices on the complex plane for: (d) landing with a psychophysiological type of problem (very high level of fatigue according to self-assessment)

Лётное упражнение включало три этапа:

- подход к аэропорту (Approach), высота 1 000—4 000 метров;
- финальный подход (Final Approach), высота 300—1 000 метров;
- приземление (Landing), высота 0—300 метров.

До и после выполнения лётных упражнений для пилотов, участвовавших в экспериментах, проводилась диагностика показателей психофункционального состояния, где — в том числе — были задействованы опросники САН («Самочувствие — Активность — Настроение») и NASA TLX (Task Load Index — измерение субъективной когнитивной нагрузки).

В качестве вычислительного инструмента для сравнений матриц вероятностей переходов между выполняемыми типами элементарных операций использовалась версия 2.0 *Интеллектуальной системы квантового моделирования (ISQM)*, реализованная на языке G среды LabVIEW (Kuravsky, 2021; Kuravsky, 2022; Kuravsky, 2024; Kuravsky, Greshnikov, Yuryev, Zlatomrezhev, 2023). Указанная версия системы реализует пакетное сравнение указанных матриц в двух переключаемых режимах:

- исследуемый фрагмент полёта попарно сравнивается со всеми заданными паттернами (режим 1);
- все паттерны и исследуемый фрагмент сравниваются между собой попарно с последующим выполнением многомерного шкалирования для полученных сравнений (режим 2).



Исследуемые фрагменты полётов включали следующие варианты посадки, выполненные пилотом средней квалификации:

- успешно выполненную посадку;
- посадку с ошибкой, обусловленной качеством пилотирования;
- неудачную посадку;
- посадку, выполненную в условиях нервного напряжения.

Исследуемый фрагмент — успешно выполненная посадка

Результаты пакетного сравнения в режиме 1 показали (рис. 3), что исследуемый фрагмент более всего похож на успешно выполненную посадку опытного пилота. Соответствие посадке с высоким качеством пилотирования имеет высокую вероятность, равную 0,61. Наибольшие отличия — от посадки с проблемой психофизиологического типа (вероятность соответствия равна 0,03).

Результаты сравнения в режиме 2 (рисунки 4—5) подтвердили эти выводы: исследуемый фрагмент ближе всего к успешной посадке опытного пилота и имеет наибольшие отличия от посадки с проблемой психофизиологического типа. Результат согласуется с экспертными оценками.

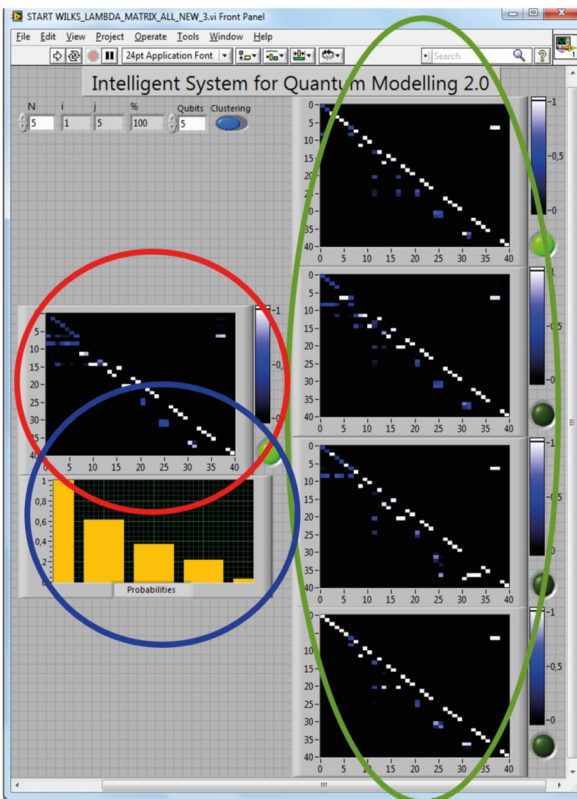


Рис. 3. Исследуемый фрагмент — успешно выполненная посадка: результаты пакетного сравнения матриц вероятностей переходов в режиме 1. Матрицы вероятностей переходов, представляющие 4 паттерна посадки, находятся внутри зелёного овала; матрица вероятностей переходов исследуемого фрагмента полёта находится внутри красного овала. Вероятности соответствия исследуемого лётного фрагмента четырём используемым паттернам посадки находятся внутри синего овала

Fig. 3. The fragment under study is a successful landing: the results of a batch comparison of transition probability matrices in mode 1. Transition probability matrices representing 4 landing patterns are located inside a green oval; the transition probability matrix of the flight fragment under study is located inside a red oval. The probabilities of matching the flight fragment under study to the four landing patterns used are inside the blue oval

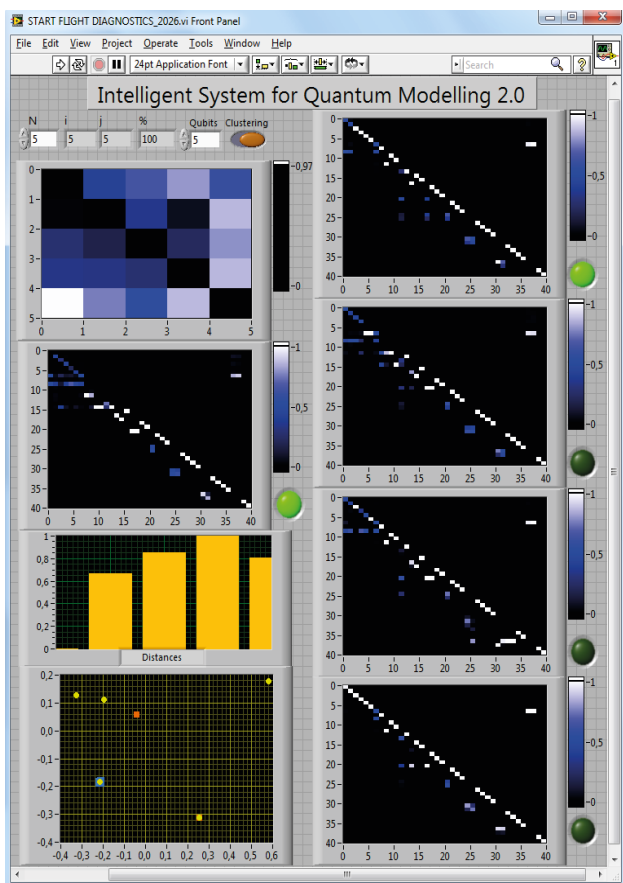


Рис. 4. Исследуемый фрагмент — успешно выполненная посадка: результаты пакетного сравнения матриц вероятностей переходов в режиме 2. Матрицы вероятностей переходов, представляющие 4 паттерна посадки, находятся внутри зелёного овала; матрица вероятностей переходов исследуемого фрагмента полёта находится внутри красного овала. Нормированные расстояния от исследуемого лётного фрагмента до используемых паттернов посадки находятся внутри синего овала

Fig. 4. The studied fragment — a successfully completed landing: results of a batch comparison of transition probability matrices in Mode 2. The transition probability matrices representing the four landing patterns are located inside the green oval; the transition probability matrix of the studied flight fragment is located inside the red oval. The normalized distances from the studied flight fragment to the used landing patterns are located inside the blue oval

Исследуемый фрагмент — посадка с ошибкой, обусловленной качеством пилотирования

Исследуемый фрагмент более всего похож на посадку опытного пилота с некорректностью первого типа (вероятность соответствия равна 0,79). Соответствие посадке с высоким качеством пилотирования составляет 0,30. Наибольшие отличия — от посадки с проблемой психофизиологического типа (вероятность соответствия равна 0,04). Результат согласуется с экспертными оценками.

Исследуемый фрагмент — неудачная посадка

Исследуемый фрагмент более всего похож на посадку, выполненную в стрессовом состоянии с высокими усилиями (вероятность соответствия равна 0,87). Наибольшие отличия — от посадки с высоким качеством пилотирования (вероятность соответствия равна 0,03). Результат согласуется с экспертными оценками.

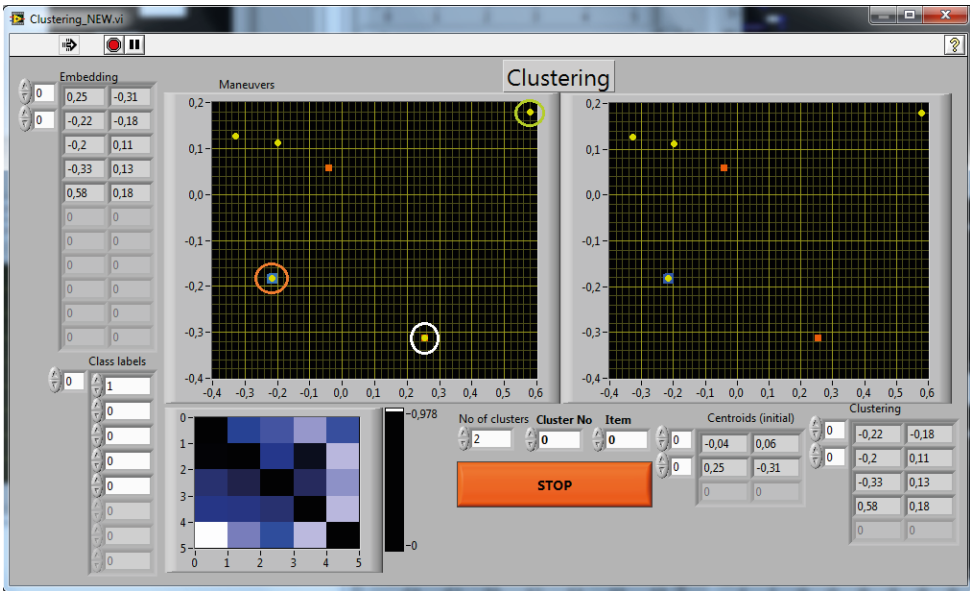


Рис. 5. Представление пяти вариантов посадки (четыре паттерна и исследуемый фрагмент полёта) в пространстве шкалирования. Белая окружность указывает на исследуемый фрагмент полёта, красная — на ближайший к нему паттерн, а зелёная — на посадку с проблемой психофизиологического типа

Fig. 5. Representation of five landing scenarios (four patterns and the flight fragment under study) in scaling space. The white circle indicates the flight fragment under study, the red circle indicates the closest pattern, and the green circle indicates the landing with a psychophysiological problem

Исследуемый фрагмент — посадка, выполненная в условиях нервного напряжения

Исследуемый фрагмент более всего похож на посадку опытного пилота с некорректностью второго типа (вероятность соответствия равна 0,57). Наибольшие отличия — от посадки с проблемой психофизиологического типа (вероятность соответствия менее 0,001). Результат согласуется с экспертными оценками.

Преимущества нового метода перед альтернативными классическими подходами

Рассмотренная постановка задачи допускает применение двух альтернативных классических подходов:

— метода взаимных правдоподобий, который до настоящего времени являлся наиболее эффективным и легко интерпретируемым способом анализа эмпирических



данных, представляющих динамику деятельности операторов сложных технических систем и допускающих формализацию в виде марковских процессов, а также; — метода стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС.

Сравнение с методом взаимных правдоподобий

Правдоподобие фрагмента полёта f_i , представленного матрицей $\mathbf{U}_{f_i} = u_{f_i,kl}$ вероятностей переходов между элементарными операциями заданных типов и заданного наиболее вероятной наблюдаемой последовательностью элементарных операций и состояний ВС $V_{f_i} = \{v_{1,f_i}, v_{2,f_i}, \dots, v_{N,f_i}\}$, по отношению к другому фрагменту полёта f_j есть условная вероятность наблюдения указанной последовательности элементарных операций и состояний ВС заданных типов V_{f_i} , в случае, когда полёт представляется матрицей $\mathbf{U}_{f_j} = u_{f_j,kl}$ вероятностей переходов между элементарными операциями заданных типов:

$$P(V_{f_i} | \mathbf{U}_{f_j}) = \prod_{k=1}^{N-1} u_{f_j, v_{k+1, f_i}, v_{k, f_i}}, \text{ где } i, j \in \{1, \dots, n\},$$

Матрица $\mathbf{Z} = -\ln P(V_{f_i} | \mathbf{U}_{f_j})$ есть *матрица взаимных правдоподобий* для исследуемой выборки фрагментов полётов. Меньшие значения соответствуют большему сходству.

Как видно из Таблицы 1, классический метод взаимных правдоподобий выдаёт один и тот же результат для всех исследованных фрагментов посадки, показывая, таким образом, отсутствие дифференциации в оценках. Три из четырёх оценок при этом некорректны. В свою очередь, метод, использующий квантовые представления деятельности, обеспечивает для имеющихся результатов наблюдений только корректные результаты, сопровождающиеся вероятностными оценками надёжности результатов, а также их должную дифференциацию. Таким образом, есть основания говорить о существенных преимуществах нового подхода по сравнению с методом взаимных правдоподобий.

Таблица 1

Сопоставление результатов диагностики (подчёркнуты результаты, согласующиеся с экспертными оценками/самооценками качества пилотирования и результатами тестов оценки/самооценки показателей психофункционального состояния)

№	Исследуемые фрагменты посадки	Паттерны посадки, определённые с помощью метода, использующего квантовые представления деятельности	Паттерны посадки, определённые с помощью классического метода взаимных правдоподобий
1	Успешно выполненная посадка	<u>Посадка с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса</u>	Посадка с некорректностью первого типа (не согласуется с экспертными оценками/ самооценкам и результатами тестов)



№	Исследуемые фрагменты посадки	Паттерны посадки, определённые с помощью метода, использующего квантовые представления деятельности	Паттерны посадки, определённые с помощью классического метода взаимных правдоподобий
2	Посадка с ошибкой, обусловленной качеством пилотирования	<u>Посадка с некорректностью первого типа</u>	<u>Посадка с некорректностью первого типа</u>
3	Неудачная посадка (посадка не состоялась)	<u>Посадка с проблемой психофизиологического типа (очень высокий уровень усталости по самооценке)</u>	Посадка с некорректностью первого типа (не согласуется с экспертными оценками/ самооценкам и результатами тестов)
4	Посадка, выполненная в условиях нервного напряжения	<u>Посадка с некорректностью второго типа</u>	Посадка с некорректностью первого типа (не согласуется с экспертными оценками/ самооценкам и результатами тестов)

Table 1

**Comparison of diagnostic results
(the results consistent with expert assessments/self-assessments
of piloting quality and the results of tests of assessment/self-assessment
of indicators of mental and functional state are emphasized)**

№	Investigated landing fragments	Landing patterns determined by using a method using quantum representations of activity	Landing patterns determined using the classical mutual likelihood method
1	Successful landing	<u>Landing with high quality piloting, low effort on the part of the pilot and low stress</u>	Landing with the first type of incorrectness (does not agree with expert assessments/self-assessments and test results)
2	Landing with an error due to the quality of piloting	<u>Landing with an incorrectness of the first type</u>	<u>Landing with an incorrectness of the first type</u>
3	Unsuccessful landing (landing did not take place)	<u>Landing with a psychophysiological type of problem (very high level of fatigue according to self-assessment)</u>	Landing with the first type of incorrectness (does not agree with expert assessments/self-assessments and test results)
4	Landing performed under conditions of nervous tension	<u>Landing with an incorrectness of the second type</u>	Landing with the first type of incorrectness (does not agree with expert assessments/self-assessments and test results)

Сравнение с методом стационарных распределений

Стационарное распределение вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС определяется решением p^* следующего уравнения:

$$p^* = M_l p^*,$$

где p^* является соответствующим собственному значению l собственным вектором стохастической матрицы вероятностей переходов M_l между n рассматриваемыми типами элементарных операций и состояний ВС в случае деятельности l .

В общем случае, матрицы M_l являются несимметричными, а их собственные значения — комплексными числами. Стохастические матрицы всегда имеют соб-



ственное число, равно l , причём это число является спектральным радиусом этих матриц. Для вычисления вектора \mathbf{p}^* можно использовать упрощённый метод Ланцоша (Wilkinson, 1988).

Поскольку элементы векторов \mathbf{p}^* интерпретируются как вероятности, их значения требуют нормировки:

$$\sum_{k=1}^n p_k^* = 1, p_k^* \geq 0 (k = 1, \dots, n).$$

Сравнение различных вариантов деятельности пилотов построено на количественном сопоставлении нормированных стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС по релевантному критерию согласия.

Распределения наблюдаемых количеств $\{F_k\}_{k=1, \dots, n}$ повторений типов элементарных операций и состояний ВС определяются путём расчёта стационарного распределения вероятностей \mathbf{p}^* , вычисленного по матрице вероятностей переходов \mathbf{M}_l , которая, в свою очередь, получается в результате вычислений выборочных оценок её элементов $m_{ij,l}$, используя эмпирические данные. Для оценки согласования с референтным распределением повторений типов элементарных операций и состояний ВС $\{F_k^*\}_{k=1, \dots, n}$ используется критерий минимума хи-квадрат (одна из форм критерия максимального правдоподобия), выражаемый статистикой Пирсона:

$$X_{n-1}^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(F_k^* - F_k)^2}{F_k^*}, \text{ где } N = \sum_{k=1}^n F_k = \sum_{k=1}^n p_k^* N, \mathbf{p}^* = (p_1^*, \dots, p_n^*)^T \text{ — стационарное}$$

распределение вероятностей повторения рассматриваемых типов элементарных операций и состояний ВС. Согласно теореме Крамера [3,6], при выполнении ряда общих условий, значения статистики X_{n-1}^2 описываются распределением χ^2 с $n-1$ степенями свободы, что позволяет использовать эту статистику для проверки гипотезы о том, что искомое распределение согласуется с референтным при заданном значении N .

В Таблице 2 сопоставлены паттерны посадки, определённые с помощью нового метода, использующего квантовые представления деятельности, и паттерны, определённые с помощью классического метода стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС ($N=120$). Как видно из Таблицы 2, классический метод стационарных распределений вероятностей не выдаёт никаких результатов для одного из исследованных фрагментов посадки, при этом выдаёт один корректный и два некорректных результата. Три из четырёх оценок некорректны. В свою очередь, метод, использующий квантовые представления деятельности, обеспечивает для имеющихся результатов наблюдений только корректные результаты, сопровождающиеся вероятностными оценками надёжности результатов, а также их должную дифференциацию. Таким образом, и здесь есть основания говорить о существенных преимуществах нового подхода по сравнению с методом стационарных распределений вероятностей.



Таблица 2

Сопоставление результатов диагностики (подчёркнуты результаты, согласующиеся с экспертными оценками/самооценками качества пилотирования и результатами тестов оценки/самооценки показателей психофункционального состояния)

№	Исследуемые фрагменты посадки	Паттерны посадки, определённые с помощью метода, использующего квантовые представления деятельности	Паттерны посадки, определённые с помощью классического метода стационарных распределений вероятностей
1	Успешно выполненная посадка	<u>Посадка с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса</u>	<u>Посадка с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса</u> ($X^2_{39} = 26,87; p > 0,92; N = 120$)
2	Посадка с ошибкой, обусловленной качеством пилотирования	<u>Посадка с некорректностью первого типа</u>	Паттерн со значимой близостью к исследуемому фрагменту не выявлен ($p < 0,0002; N = 120$)
3	Неудачная посадка (посадка не состоялась)	<u>Посадка с проблемой психофизиологического типа (очень высокий уровень усталости по самооценке)</u>	Посадка с высоким качеством пилотирования, низкими усилиями со стороны пилота и низким уровнем стресса ($X^2_{39} = 48,82; p > 0,13; N = 120$) — не согласуется с экспертными оценками/самооценками и результатами тестов
4	Посадка, выполненная в условиях нервного напряжения	<u>Посадка с некорректностью второго типа</u>	Посадка с некорректностью первого типа ($X^2_{39} = 11,38; p > 0,999; N = 120$) — не согласуется с экспертными оценками/самооценками и результатами тестов

Table 2

Comparison of diagnostic results (the results consistent with expert assessments/self-assessments of piloting quality and the results of tests of assessment/self-assessment of indicators of mental and functional state are emphasized)

№	Investigated landing fragments	Landing patterns determined by using a method using quantum representations of activity	Landing patterns determined using the classical method of stationary probability distributions
1	Successful landing	<u>Landing with high quality piloting, low effort on the part of the pilot and low stress</u>	<u>Landing with high quality piloting, low effort on the part of the pilot and low stress</u> ($X^2_{39} = 26,87; p > 0,92; N = 120$)
2	Landing with an error due to the quality of piloting	<u>Landing with an incorrectness of the first type</u>	A pattern with significant proximity to the fragment under study has not been identified. ($p < 0,0002; N = 120$)
3	Unsuccessful landing (landing did not take place)	<u>Landing with a psychophysiological type of problem (very high level of fatigue according to self-assessment)</u>	Landing with high quality piloting, low effort on the part of the pilot and low stress ($X^2_{39} = 48,82; p > 0,13; N = 120$) — does not agree with expert assessments/self-assessments and test results



№	Investigated landing fragments	Landing patterns determined by using a method using quantum representations of activity	Landing patterns determined using the classical method of stationary probability distributions
4	Landing performed under conditions of nervous tension	<u>Посадка с некорректностью второго типа</u>	Landing with an incorrectness of the first type ($\chi^2_{39} = 11,38; p > 0,999; N = 120$) — does not agree with expert assessments/self-assessments and test results

Комментарий к сравнениям

Дополнительный содержательный пример, демонстрирующий преимущества нового подхода, рассмотрен в работах (Kuravsky, 2024; (Kuravsky, Greshnikov, Kozyrev and etc., 2024)).

Основной причиной, которая определяет преимущества рассматриваемого метода, является возможность анализа наблюдений во временной динамике (во «временной развёртке»), которая игнорируется в случае традиционных подходов. Ранее проведённые и представленные здесь исследования показали, что учёт временной динамики наблюдаемых событий критически важен для корректной диагностики деятельности пилотов.

Основные выводы и результаты

1. Разработан новый метод определения состояний и типов деятельности пилотов с помощью квантовых представлений, построенных на основе анализа марковских процессов, представленных матрицами вероятностей переходов между типами элементарных операций и состояний ВС.
2. Диагностические оценки, полученные с помощью представленного метода, согласуются с экспертными оценками и результатами оценки психофункционального состояния.
3. Выполненные сравнения позволяют говорить о существенных преимуществах нового подхода по сравнению с методом взаимных правдоподобий и методом стационарных распределений вероятностей повторения типов элементарных операций и состояний ВС.
4. Основной причиной, определяющей преимущества рассматриваемого метода, является возможность анализа наблюдений во временной динамике, которая игнорируется в традиционных подходах.

Список источников / References

1. Барабанщиков, В.А., Жегалло, А.В. (2013). Регистрация и анализ направленности взгляда человека. М.: Институт психологии РАН.
Barabanshchikov, V.A., Zhegallo, A.V. (2013). *Registration and analysis of human eye gaze direction*. Moscow: Institute of Psychology RAS. (In Russ.)
2. Куравский, Л.С., Юрьева, Н.Е., Юрьев, Г.А. и др. “The Intelligent System for Flight Analysis V. 3.3”. Свид. о регистрации ПО 2021668683, 2021.



- Kuravsky, L.S., Yuryeva, N.E., Yuryev, G.A. and etc. “The Intelligent System for Flight Analysis V. 3.3”. Software Registration Certificate 2021668683, 2021.
3. Куравский, Л.С., Козырев, А.Д., Грешников, И.И. (2024). Математическая модель сопутствующей деятельности пилота и ее применение для объективной оценки его состояния и профессиональной подготовки. *Экспериментальная психология*, 17(1), 161—180. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170111>
Kuravsky, L.S., Kozyrev, A.D., Greshnikov, I.I. (2024). Mathematical Model of the Pilot Associated Activities and Its Application for Objective Professional Training and Condition Assessment. *Experimental Psychology (Russia)*, 17(1), 161—180. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/exppsy.2024170111>
 4. Марковские модели в задачах диагностики и прогнозирования / Под ред. Л.С. Куравского. М.: МГППУ, 2017.
Markov models in diagnostic and forecasting problems / Ed. L.S. Kuravsky. Moscow: Moscow State University of Psychology and Education, 2017.
 5. Borg I., Groenen P.J.F. (2005). *Modern Multidimensional Scaling Theory and Applications*. Springer.
 6. Cox T.F., Cox M.A.A. (2001). *Multidimensional Scaling*. 2nd ed. Chapman and Hall/CRC.
 7. Cramer, H. (1999). *Mathematical methods of statistics*. Princeton University Press.
 8. Kuravsky, L.S. (2021). Modeling dynamical behavior of stochastic systems. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, *42*(10), 2364—2376.
 9. Kuravsky, L.S. (2022). Simplification of solving diagnostics problems. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, *43*(7), 1669—1682.
 10. Kuravsky, L.S. (2024). Quantum representations and their applications in diagnostics. *De Libri*.
 11. Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Orishchenko, V.A. (2025). Quantum representation of the civil aircraft pilot activity. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 46(6), 2609—2621.
 12. Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Kozyrev, A.D., et al. (2024). A mathematical model for representing the related operator professional activities. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 45(6), 2534—2551.
 13. Kuravsky, L.S., Greshnikov, I.I., Yuryev, G.A., Zlatomrezhev, V.I. (2023). Synthesis of civil aircraft control using empirical data and quantum filtering. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 44(6), 2079—2100.
 14. Kuravsky, L.S., Orishchenko, V.A., Greshnikov, I.I. (2026). The quantum likelihood method. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 47(6). (in press)
 15. Lloyd, E. (1984). *Handbook of applicable mathematics: Vol. 6. Statistics*. Wiley.
 16. Morrison, D.F. (1976). *Multivariate statistical methods* (2nd ed.). McGraw-Hill.
 17. Nielsen, M.A., Chuang, I.L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press.
 18. Petz, D. (2008). *Quantum information theory and quantum statistics*. Springer.
 19. Rao, C.R. (1973). *Linear statistical inference and its applications*. Wiley.
 20. Rao, C.R. (Ed.). (1980—1999). *Handbook of statistics* (Vols. 1—18). North Holland.
 21. von Neumann, J. (1955). *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton University Press.
 22. Wilkinson, J.H. (1988). *The algebraic eigenvalue problem*. Clarendon Press.



Информация об авторах

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

Иван Игоревич Грешников, кандидат технических наук, начальник лаборатории, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФГУП ГосНИИАС), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru

Виталий Алексеевич Орищенко, магистрант, лаборант-исследователь, факультет информационных технологий, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6696-5147>, e-mail: vitalyorishchenko@gmail.com

Наталья Евгеньевна Юрьева, кандидат технических наук, научный сотрудник, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com

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

Иннокентий Александрович Махортов, аспирант, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ); инженер 2 категории, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФГУП ГосНИИАС), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6919-9419>, e-mail: inok546@ya.ru

Сергей Сергеевич Ермаков, кандидат психологических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Информационные технологии для психологической диагностики», доцент кафедры «Возрастная психология имени профессора Л.Ф. Обуховой» факультета «Психология образования», доцент кафедры «Прикладная математика» факультета «Информационные технологии», Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4330-2618>, e-mail: ermakovss@mgppu.ru

Андрей Вячеславович Соколов, начальник сектора, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (ФГУП ГосНИИАС), Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3387-8847>, e-mail: sokoland@mail.ru

Анна Андреевна Захарьчева, пилот авиакомпании «Сибирь», Новосибирск, Российская Федерация; аспирант, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева (ФГБОУ ВО УИГА), Ульяновск, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2620-6333>, e-mail: anna.gorlova97@gmail.com

Information about the authors

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



Ivan I. Greshnikov, PhD (Engineering), Head of Laboratory, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5474-3094>, e-mail: vvanes@mail.ru

Vitaly A. Orishchenko, master's student, researcher, faculty of information technologies, Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6696-5147>, e-mail: vitalyorischenko@gmail.com

Nataliya E. Yuryeva, PhD (Engineering), Research Fellow, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com

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

Innokenty A. Makhortov, Graduate Student, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE); Engineer of the 2nd Category, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6919-9419>, e-mail: inok546@ya.ru

Sergey S. Ermakov, Candidate of Science (Psychology), Senior Researcher of the Laboratory "Information Technologies for Psychological Diagnostics" Associate Professor of the Department of "Age Psychology named after Professor L.F. Obukhova" of the Faculty of "Psychology of Education", Associate Professor of the Department of "Applied Mathematics" of the Faculty of "Information Technology", Moscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4330-2618>, e-mail: ermakovss@mgppu.ru

Andrey V. Sokolov, Head of the Sector, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3387-8847>, e-mail: sokoland@mail.ru

Anna A. Zakharcheva, Pilot, "Siberia" Airlines, Novosibirsk, Russia; Graduate Student, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2620-6333>, e-mail: anna.gorlova97@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов и согласовали окончательный текст рукописи.

Contribution of the authors

All authors participated in the discussion of the results and approved the final text of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.02.2026

Поступила после рецензирования 24.02.2026

Принята к публикации 06.03.2026

Опубликована 30.06.2026

Received 2026.02.10

Revised 2026.02.24

Accepted 2026.03.06

Published 2026.06.30