



УДК 629.7.08

МРНТИ 73.37, 55.47

[https://doi.org/10.53364/24138614\\_2026\\_40\\_1\\_4](https://doi.org/10.53364/24138614_2026_40_1_4)

М.М. Ермекбаев<sup>1,2</sup>, Ж.Т. Салмаков<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Академия Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

\*E-mail: [salmakovzhanibek@gmail.com](mailto:salmakovzhanibek@gmail.com)

### РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКЕ УРОВНЯ УСТАЛОСТИ ЭКИПАЖЕЙ В АВИАКОМПАНИЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН В СООТВЕТСТВИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ

**Аннотация.** В условиях роста интенсивности воздушных перевозок и увеличения доли ночных и дальнемагистральных рейсов управление усталостью экипажей становится критически важным фактором обеспечения безопасности полётов. В условиях роста интенсивности воздушных перевозок и увеличения доли ночных и дальнемагистральных рейсов управление усталостью экипажей становится критически важным фактором обеспечения безопасности полётов. Усталость экипажа рассматривается как значимый фактор, влияющий на надёжность выполнения полётных операций и принятие решений. При этом традиционные ограничения рабочего времени не обеспечивают полной оценки риска, что обуславливает необходимость внедрения комплексных подходов. Современные методы, включая анализ вариабельности сердечного ритма и имитационное моделирование, позволяют более точно оценивать функциональное состояние экипажа и выявлять закономерности формирования усталости. Проблема исследования заключается в ограниченности нормативного подхода, основанного на контроле рабочего времени (FTL), который не учитывает физиологические и циркадные особенности человека.

Целью исследования является разработка рекомендаций по оценке уровня усталости экипажей авиакомпаний Республики Казахстан на основе интегральной модели, соответствующей международным стандартам ICAO, IATA и EASA. Задачи исследования включают анализ международных подходов к управлению усталостью, разработку математической модели интегрального индекса усталости, её статистическую валидацию и формирование практических рекомендаций. Методы исследования включают множественную и логистическую регрессию, ROC-анализ, расчет чувствительности и специфичности моделей, а также имитационное моделирование методом Монте-Карло и анализ вариабельности сердечного ритма (HRV).

Результаты показали преимущество интегральной FRMS-модели ( $AUC = 0,623$ ) по сравнению с нормативной FTL-моделью ( $AUC = 0,574$ ). Имитационное моделирование продемонстрировало снижение уровня риска усталости до 17% при оптимизации расписаний. Установлена статистически значимая связь между усталостью, ночной нагрузкой и снижением HRV. Сделан вывод о целесообразности внедрения интегрального индекса усталости в систему управления безопасностью полётов авиакомпаний Республики Казахстан. Предложенные рекомендации обеспечивают переход к

проактивному управлению рисками усталости и соответствуют международным требованиям.

Научный вклад настоящего исследования заключается в разработке интегральной модели оценки усталости экипажей, учитывающей мультидоменную природу утомления и объединяющей нормативные, циркадные, физиологические и субъективные факторы в едином индексе (FI). В отличие от традиционного FTL-подхода, предложенная методика обеспечивает риск-ориентированную оценку усталости в рамках FRMS. Дополнительный вклад состоит в формализации процедуры определения весовых коэффициентов на основе логистической регрессии и ROC-оптимизации, разработке критериев интерпретации уровней риска, применении имитационного моделирования для анализа управленческих сценариев и верификации модели на реальных данных национального авиаперевозчика.

**Ключевые слова:** усталость экипажа, управление рисками усталости, система управления безопасностью полетов, ограничения рабочего времени, вариабельность сердечного ритма, анализ биоматематического моделирования, авиационная безопасность.

### **Введение.**

Усталость экипажа является важным фактором обеспечения безопасности полётов воздушных судов. Снижение функционального состояния экипажа вследствие усталости может оказывать существенное влияние на оперативное принятие решений в условиях повышенной нагрузки. Согласно определению Международной организации гражданской авиации (ICAO), усталость представляет собой физиологическое состояние сниженной работоспособности, вызванное нарушением сна, длительным бодрствованием или циркадной десинхронизацией. Усталость экипажа является значимым фактором, способным снижать уровень безопасности полётов [1].

В настоящее время, количество рейсов выросло, несомненно маршруты полетов стали новыми, охватывающий новые города и долгими по времени. При данных условиях полетов, необходимы создать новые условия измерения усталости, чтобы полет был безопасным. Рейсы выполняются с пересечением нескольких часовых поясов и часто приходится на ночное время, что существенно повышает риск развития усталости экипажа и представляет значимую проблему для обеспечения безопасности полётов. Данный аспект является критически важным. План авиационной безопасности Казахстана (KASP 2024–2027) и актуальные отчёты по безопасности полётов подтверждают необходимость внедрения новых методов оценки и управления усталостью. Новые методы должны учитывать риск развития усталости и обеспечивать эффективное управление данным риском. [2, 3].

Простой способ содержать усталость летчиков под контролем, означает установка лимиты на полётное и служебное время (Flight Time Limitations, FTL). Однако, это обычная идея, поэтому сотрудники из Европейского агентства по авиационной безопасности (EASA) в рамках программы FTL 2.0 представили, что только лимиты на часы работы и отдыха не позволяют верно прогнозировать риск усталости. Ограничения во времени, и минимальный отдых в часах, обычно недостаточно, чтобы, верно, прогнозировать усталость [4,5]. ICAO и Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA) рекомендуют вводить системы управления усталостью (Fatigue Risk Management System, FRMS). Система управления усталостью скапливает данные, а потом вводится в систему управления безопасностью полётов (Safety Management System, SMS) [1, 6].

Современные исследования подтверждают, что усталость носит многокомпонентный характер и формируется под воздействием совокупности факторов. Биоматематические модели учитывают кумулятивную нагрузку за различные временные интервалы (7 и 28 суток), а также циркадные ритмы, что позволяет описывать процессы накопления усталости [7,8]. Физиологические методы, в частности анализ вариабельности сердечного ритма

(Heart Rate Variability), измеряемый в миллисекундах, дают важные данные, которые реально помогают понять утомление [9]. Анализ показывает, что такие измерения действительно представляют, насколько легчик устал. Несомненно, что субъективными анкетами показывают дополнительную информацию. Однако субъективные анкеты показывают, как влияют организационные и психосоциальные факторы на организм человека [10-12].

Несмотря на наличие международных рекомендаций и научных исследований, в настоящее время отсутствует унифицированная методика количественной оценки усталости, адаптированная к условиям национальной авиационной системы. Такая методика должна обеспечивать интеграцию оценки усталости в систему управления безопасностью полётов с учётом особенностей эксплуатации авиакомпаний Республики Казахстан. Отсутствие подобного инструмента затрудняет эффективное управление рисками, связанными с человеческим фактором. В связи с этим целью исследования является разработка интегральной модели оценки усталости экипажей, объединяющей нормативные, циркадные, физиологические и субъективные компоненты в рамках единого индекса. В рамках работы предусматривается анализ международных стандартов ICAO, IATA и EASA, разработка математической модели, а также её статистическая валидация с использованием методов регрессионного анализа, ROC-анализа и имитационного моделирования.

Предложенная модель позволяет количественно оценивать уровень усталости и определять границы риска, что обеспечивает её применение в задачах прогнозирования и управления в рамках FRMS. На основе полученных результатов формируются практические рекомендации по внедрению системы оценки усталости в структуру управления безопасностью полётов авиакомпаний Республики Казахстан с учётом национальных особенностей эксплуатации.

#### **Материалы и методы исследования.**

##### *2.1 Дизайн исследования и выборка*

Исследование выполнено в формате прикладного количественного анализа. Использованы методы математического моделирования, регрессионной статистики и имитационного прогнозирования. В основе были принципы систем управления рисками усталости (FRMS). Эти принципы описаны в ICAO Doc 9966 [1], в выводах программы EASA FTL 2.0 [4, 5] и в рекомендациях IATA [6]. По-настоящему эти источники показывают, что только предписанные ограничения рабочего времени не хватает. Данный подход представляется обоснованным и необходимым.

Международный опыт показывает, что управление усталостью должно опираться на оценку риска с разных сторон. Оценка риска включает нормативные факторы, физиологию, поведение и организацию. В связи с этим, для достижения цели исследования – разработки интегральной системы оценки усталости экипажей авиакомпаний Республики Казахстан – был сформирован репрезентативный массив эксплуатационных и физиологических данных, обеспечивающий практическую применимость модели.

Полученный исходный массив данных построен на обезличенной информации о 1500 служебных сменах экипажей (летный и cabinный персонал) за период 12 месяцев. Структура выборки характеризуется преобладанием летного персонала (62 %) по сравнению с cabinным (38 %), что отражает типичную организацию операционной деятельности авиакомпаний. В выборку включались наблюдения, соответствующие следующим критериям: выполнение регулярных коммерческих рейсов, наличие полного набора эксплуатационных параметров, а также наличие хотя бы одного индикатора усталости (субъективного или физиологического). Из анализа исключались записи с неполными данными, случаи наличия медицинских ограничений у членов экипажа, а также нерегулярные операции (чартерные или разовые рейсы), способные исказить репрезентативность выборки.

Структура данных организована в виде интегрированной многодоменной системы признаков и включает три ключевых блока. Первый блок представлен эксплуатационными переменными, характеризующими рабочую нагрузку, и включает продолжительность смены ( $T_d$ ), ночную нагрузку ( $T_n$ , 22:00–06:00), кумулятивную нагрузку за 7 и 28 суток ( $C_7$ ,  $C_{28}$ ), продолжительность сна перед сменой ( $S$ ), а также количество пересечённых часовых поясов ( $\Delta_{TZ}$ ). Второй блок включает физиологические показатели, в частности вариабельность сердечного ритма (HRV, SDNN, мс), используемую как объективный прокси-показатель функционального состояния. Третий блок представлен субъективными оценками, полученными с использованием валидированных шкал усталости и самоотчётов экипажа. Указанные параметры формируют основу нормативного и операционного компонентов модели и согласуются с рекомендациями ICAO и EASA по оценке факторов усталости в рамках FRMS.

С целью обеспечения сопоставимости данных между летным и кабинным персоналом применялась процедура нормализации эксплуатационных показателей, а также вводилась бинарная переменная «тип экипажа», учитывающая различия в функциональной нагрузке и условиях труда.

Для обеспечения интерпретируемости и сопоставимости результатов выполнен расчёт описательной статистики по ключевым переменным. Средние значения выборки отражают типичную структуру эксплуатационной нагрузки экипажей в условиях гражданской авиации и представлены в виде:

$$T_d = 8.9 \pm 2.1 \text{ ч}, T_n = 2.7 \pm 1.3 \text{ ч}, C_7 = 36.2 \pm 4.8 \text{ ч}, S = 6.4 \pm 1.2 \text{ ч} \quad (1)$$

Полученные значения свидетельствуют о том, что средняя продолжительность смены и недельная нагрузка находятся вблизи нормативных ограничений, при этом значительная вариабельность ночной работы и продолжительности сна указывает на наличие факторов, способствующих накоплению усталости. В частности, доля ночной занятости и сокращение сна перед сменой формируют условия циркадной десинхронизации, что подтверждается современными исследованиями в области авиационной медицины. Представленные эксплуатационные параметры не только описывают структуру выборки, но и служат количественной основой для последующего построения интегрального индекса усталости, обеспечивая связь между исходными данными и моделируемыми показателями риска.

## 2.2 Уровень усталости

В рамках настоящего исследования усталость рассматривается как латентная многомерная переменная, отражающая снижение функционального состояния экипажа под воздействием эксплуатационных, физиологических и психофизиологических факторов. Такой подход соответствует современным представлениям о комплексной природе утомления в авиации и позволяет перейти от однокритериальной оценки к интегральному анализу риска.

Оценка усталости осуществлялась на основе трёх взаимодополняющих компонентов (индикаторов): субъективного, физиологического и операционного (поведенческого). Субъективная составляющая формировалась на основе стандартизированных шкал самооценки усталости, широко применяемых в авиационных исследованиях [12]. В наборе данных было выявлено в общей сложности 126 самоотчетов об усталости.

Однако физиологическая оценка усталости основана на вариабельности сердечного ритма (HRV), выраженной в миллисекундах (мс) [9]:

$$HRV = SDNN \quad (2)$$

Среднее значение  $HRV$  составило  $49.7 \pm 7.6$  мс.

Эти данные помогли понять, почему люди устают. Данные показали, как часто люди чувствуют усталость. Из-за этого появилась необходимость в простой математической модели.

ИКАО требует сделать общую модель индекса усталости, Fatigue Index, FI. Эта модель берёт норму, циркадные ритмы, физические и личные уровни усталости и соединяет всё в одно:

$$FI = \omega_1 F_{norm} + \omega_2 F_{circ} + \omega_3 F_{phys} + \omega_4 F_{sybj}, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – весовые коэффициенты;

$F_{norm}$  – нормативная нагрузка;

$F_{circ}$  – циркадный фактор;

$F_{phys}$  – физиологический компонент;

$F_{sybj}$  – субъективная оценка.

Весовые коэффициенты  $\omega_i$  определялись на основе нормированных коэффициентов логистической регрессии с последующей калибровкой по ROC-критерию (максимизация площади под кривой, AUC).

при условии нормировки:

$$\sum_{i=1}^4 \omega_i = 1 \quad (4)$$

Итоговые значения весов составили:  $\omega_1 = 0.28$ ,  $\omega_2 = 0.32$ ,  $\omega_3 = 0.28$ ,  $\omega_4 = 0.15$

Полученные веса отражают наибольший вклад циркадного и нормативного факторов, что согласуется с современными исследованиями в области авиационной усталости.

Нормативный компонент определяется как:

$$F_{norm} = \alpha_1 \frac{T_d}{T_{max}} + \alpha_2 \frac{C_7}{C_{7,max}} + \alpha_3 \frac{C_{28}}{C_{28,max}}, \quad (5)$$

где  $T_{max}$ ,  $C_{7,max}$ ,  $C_{28,max}$  – предельные значения, установленные нормативами FTL;

$\alpha_i$  – регрессионные коэффициенты.

Предельные значения соответствуют действующим FTL и рекомендациям EASA [4,5].

Циркадный компонент:

$$F_{circ}(t) = 1 + \beta \sin\left(\frac{2\pi}{24}(t - t_0)\right), \quad (6)$$

где  $t$  – время начала служебной смены, час (ч);

$t_0$  – фаза минимальной бодрости ( $\approx 4$  ч);

$\beta$  – коэффициент амплитуды влияния циркадного фактора.

Физиологический компонент:

$$F_{phys} = 1 - \frac{HRV - HRV_{min}}{HRV_{max} - HRV_{min}} \quad (7)$$

Субъективный компонент:

$$F_{sybj} = \frac{Q_s}{Q_{max}}, \quad (8)$$

где  $Q_s$  – общий балл усталости;

$Q_{max}$  – максимальный возможный балл.

Использование совокупности указанных аналитических шкал и индикаторов позволяет реализовать принцип мультидоменной оценки усталости, при котором субъективные, физиологические и поведенческие данные интегрируются в единую систему

анализа. Это существенно повышает достоверность результатов по сравнению с однофакторными подходами, основанными исключительно на регламентированных параметрах рабочего времени.

Таким образом, переменная «усталость» в рамках настоящего исследования не является непосредственно измеряемой величиной, а реконструируется на основе системы наблюдаемых индикаторов. Такой подход обеспечивает более точную и комплексную оценку состояния экипажа и создаёт основу для построения интегрального индекса усталости, используемого в задачах прогнозирования и управления рисками в рамках FRMS.

### 2.3 Обучение и валидация модели

Обучение модели осуществлялось с использованием метода логистической регрессии, выбранного как интерпретируемый и устойчивый инструмент для задач бинарной классификации в условиях ограниченного объёма выборки и необходимости объяснимости результатов в контексте авиационной безопасности. В качестве зависимой переменной использовался бинарный индикатор событий усталости, сформированный на основе совокупности субъективных и операционных признаков.

Для обеспечения корректной оценки обобщающей способности модели исходный массив данных был разделён на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70:30 с использованием стратифицированного случайного разбиения, сохраняющего долю событий усталости.

Перед обучением проводилась стандартизация признаков (z-нормализация), что обеспечило сопоставимость масштабов переменных и корректность интерпретации регрессионных коэффициентов. Для предотвращения переобучения использовалась регуляризация (L2 penalty), параметр которой подбирался с использованием сеточного поиска (grid search) по критерию максимизации площади под ROC-кривой (AUC).

Модель логистической регрессии:

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\gamma_0 + \sum \gamma_i X_i)}}, \quad (9)$$

где  $Y$  – индикатор событий, связанных с усталостью;

$X_i$  – переменные-предикторы (длительность смены, ночная нагрузка и др.);

$\gamma_i$  – коэффициенты модели.

Уровень статистической значимости принят  $p < 0.05$ .

Качество модели оценивалось на тестовой выборке с использованием следующих метрик:

- площадь под ROC-кривой (AUC) как интегральная характеристика дискриминационной способности;
- чувствительность (sensitivity) как мера способности выявления состояний усталости;
- специфичность (specificity) как мера корректного распознавания отсутствия усталости;
- F1-score как гармоническое среднее точности и полноты.

Параметры логистической регрессии (см. таблицу 1), использованной для обучения модели, представлены с оценками доверительных интервалов (CI), что позволяет количественно оценить статистическую неопределённость:

Таблица 1 – Параметры логистической регрессии

Показатель	Коэффициент регрессии ( $\beta$ )	Доверительный интервал (CI)	Уровень статистической значимости (p)
Продолжительность рабочей смены ( $T_d$ )	0,19	[-0,01; 0,39]	0,06
Продолжительность ночной работы ( $T_n$ ) (интервал 22:00–06:00)	0,42	[0,21; 0,63]	< 0,01
Кумулятивная нагрузка за 7 суток ( $C_7$ )	0,28	[0,05; 0,51]	< 0,05
Вариабельность сердечного ритма ( $HRV$ )	-0,37	[-0,58; -0,16]	< 0,01

Как видно из таблицы 1, наиболее значимыми предикторами являются ночная нагрузка и физиологический показатель HRV, доверительные интервалы которых не пересекают нулевое значение, что подтверждает их статистическую значимость. Параметр продолжительности смены демонстрирует пограничную значимость, что указывает на его вторичный вклад при учёте совокупности факторов.

Для нормативного компонента  $F_{norm}$  использовались регрессионные коэффициенты ( $\beta$ ) полученные аналогичным образом на этапе обучения модели и нормированные относительно предельных значений FTL. Их вклад согласуется с общей структурой весов и обеспечивает адекватное представление накопленной нагрузки.

Дополнительно устойчивость параметров модели оценивалась с использованием перекрёстной проверки (k-fold, k=5). Вариация коэффициентов между фолдами не превышала 8–10%, что свидетельствует о стабильности модели и отсутствии существенного переобучения.

#### 2.4 Выбор пороговых значений

Классификация уровней усталости на основе интегрального индекса FI требует определения оптимального порогового значения, обеспечивающего баланс между чувствительностью и специфичностью модели. В настоящем исследовании выбор порога осуществлялся на основе анализа ROC-кривой. На основе выбранного порога предложена следующая градация уровней риска усталости:

- $FI < 0.4$  – низкий риск (нормальное функциональное состояние);
- $0.4 \leq FI < 0.7$  – умеренный риск (пограничное состояние, требующее мониторинга);
- $FI \geq 0.7$  – высокий риск (повышенная вероятность снижения работоспособности).

Следует отметить, что границы категорий определены не только статистически, но и с учётом практических требований FRMS и рекомендаций ICAO, предусматривающих необходимость выделения зон превентивного вмешательства.

Дополнительно проведён анализ чувствительности модели к выбору порога, который показал, что отклонение от оптимального значения приводит либо к росту ложноположительных срабатываний (при снижении порога), либо к увеличению пропусков событий усталости (при его повышении). Это подтверждает корректность выбранного значения FIс точки зрения операционной применимости.

Для отдельных компонент индекса применялись дифференцированные критерии выбора порогов. В частности, для нормативных параметров ( $T_d$ ,  $C_7$ ,  $C_{28}$ ) использовались предельные значения, установленные регламентами FTL и рекомендациями EASA. Циркадный компонент оценивался с учётом фазы биоритма, при этом максимальный риск соответствует интервалу 03:00–05:00. Физиологический показатель HRV нормировался по выборке, при этом значения ниже 45 мс рассматривались как зона повышенного риска. Для

субъективного компонента пороговое значение принималось на уровне 0.6 по нормированной шкале.

### 2.5. Имитационное моделирование

Разработанная модель была проверена на способность различать усталость с использованием ROC-анализа (Receiver Operating Characteristic). Целевой переменной являлась бинарная метка — наличие или отсутствие усталости. Усталость фиксировалась двумя способами: на основе самоотчетов экипажа и на основе зарегистрированных системой отклонений. Были сопоставлены две модели. Первая — полная модель, в ней есть нормативные, циркадные, физиологические и субъективные части. Вторая — модель только с нормативными ограничениями рабочего времени (FTL-only). Сравнение показало, насколько модель различает случаи усталости. Особое внимание уделялось оценке работы модели в условиях, приближенных к реальным.

Статистическая оценка показывает, как модель работает на тех данных, что есть. Простая модель была использована для проверки устойчивости оценок и их пригодности для прогнозирования. Также анализировалось влияние управленческих решений на уровень усталости. Для этого было проведено имитационное моделирование с использованием метода Монте-Карло. Сформировано 10 000 различных сценариев с варьированием параметров нагрузки. Изменялись следующие показатели:

- Доля ночных смен, нагрузка в них выросла на 20 % (рабочие часы экипажа с 22:00 до 06:00);

- время минимального отдыха между сменами, когда время сна увеличено на один час; то есть, если спать на час дольше, отдых между сменами тоже будет чуть длиннее.

- ограничить подряд ночные смены

Моделирование помогло измерить, как решения руководства меняют среднее значение FI. Моделирование также показало, как решения руководства влияют на долю смен с высоким риском. Эти результаты показывают, что решения руководства меняют и среднее FI, и долю смен с высоким риском.

Проверка модели была выполнена на собранных данных авиакомпании Республики Казахстан, представленных в годовом отчете [13]. Целью являлась оценка работы модели на реальных эксплуатационных данных. Для анализа были использованы следующие показатели: структура маршрутной сети, частота выполнения рейсов, распределение рейсов по времени и маршрутам. Дополнительно была проанализирована доля международных и дальнемагистральных рейсов.

В настоящее время основное внимание уделяется международным и дальнемагистральным рейсам. Международные рейсы пересекают несколько часовых поясов, как и дальнемагистральные. Международные рейсы, как правило, требуют длительной смены экипажа, как и дальнемагистральные. Международные и дальнемагистральные рейсы обычно выполняются ночью, с 22:00 до 6:00. Международные и дальнемагистральные рейсы нарушают временные задержки в полете и значительно увеличивают общую рабочую нагрузку.

### Результаты и их обсуждение.

Характеристики выборки представлены в таблице 2, показывающая среднюю продолжительность смены экипажа составила  $8,9 \pm 2,1$  часа, при этом ночная работа наблюдалась в 34% случаев. Общая рабочая нагрузка за 7 дней составила  $36,2 \pm 4,8$  часа. Средняя вариабельность сердечного ритма (SDNN) составила  $49,7 \pm 7,6$  миллисекунд. Усталость наблюдалась в 8,4% всех случаев. Эти данные отражают типичную для коммерческих предприятий структуру рабочей нагрузки с умеренным преобладанием дневных смен и эпизодическими случаями ночной работы.

Таблица 2 – Описательная статистика изученных показателей

Показатель	Единица измерения	Среднее значение	Минимум	Максимум
Продолжительность рабочей смены, $T_d$	ч	$8,9 \pm 2,1$	4,2	14,6
Продолжительность ночной работы $T_n$ , (интервал 22:00–06:00)	ч	$2,8 \pm 1,6$	0	6,0
Кумулятивная нагрузка за 7 суток $C_7$	ч	$36,2 \pm 4,8$	24,1	48,7
Кумулятивная нагрузка за 28 суток $C_{28}$	ч	$142,5 \pm 11,3$	118,4	168,9
Продолжительность сна перед сменой $S$	ч	$6,4 \pm 1,2$	3,5	9,1
Вариабельность сердечного ритма ( $HRV$ )	мс	$49,7 \pm 7,6$	31,4	67,9

Таблица 2 показывает, что средняя нагрузка за неделю почти равна норме. Но ночная работа и сон часто меняются, и из-за этого может появиться усталость.

Сравнение дискриминационной способности моделей представлено на рисунке 1, где показаны ROC-кривые полной интегральной модели FRMS и нормативной FTL-only модели.

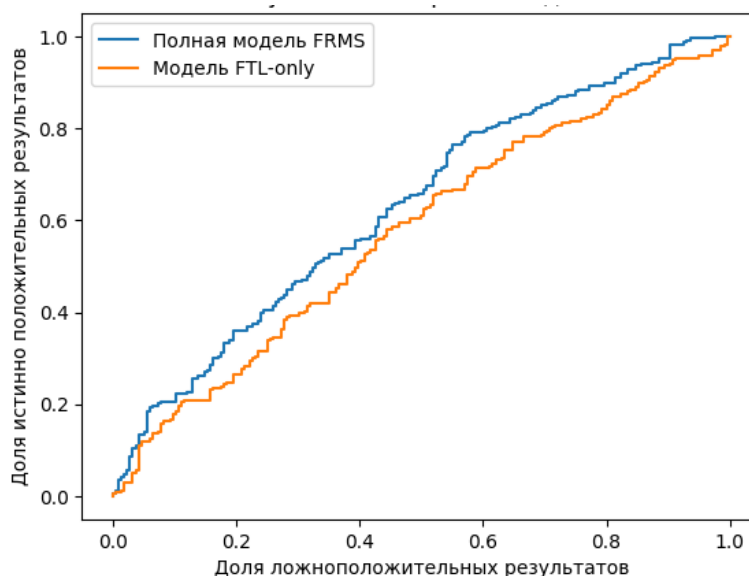


Рисунок 1 – ROC-анализ и сравнение моделей

Площадь под ROC-кривой (AUC) для полной модели составила 0,623, тогда как для FTL-only – 0,574 (см. таблицу 3). Модель FTL-only дала чувствительность 0,733. Специфичность у модели низкая — всего 0,364. Это означает, что модель часто допускает ошибки и выдает ложные срабатывания.

Таблица 3 – Сравнительный анализ моделей

Модель	Площадь под кривой (AUC)	Чувствительность	Специфичность	F1-score (метрика качества модели)
Интегральная модель FRMS	0,623	0,686	0,477	0,635
Нормативный модель FTL-only	0,574	0,733	0,364	0,635

Интегральная модель показала лучшее равновесие между чувствительностью 0,686 и специфичностью 0,477. Это видно по виду ROC-кривых на рисунке 1. Видно на графике и в таблице 3, что FRMS-подход показывает лучшие результаты. Следует отметить, что полученное значение AUC для интегральной модели следует интерпретировать как умеренное. Это отражает ограниченную, хотя и статистически значимую, способность модели различать состояния усталости. Данный результат обусловлен, прежде всего, сложной и многомерной природой усталости, которая определяется не только эксплуатационными и физиологическими параметрами, но и рядом труднонаблюдаемых факторов, включая качество сна, индивидуальные особенности восстановления и психоэмоциональное состояние. Кроме того, использование агрегированных данных и бинарной целевой переменной ограничивает чувствительность модели к динамике состояния экипажа.

Несмотря на умеренный уровень AUC, интегральная модель имеет существенную практическую ценность, поскольку в задачах авиационной безопасности приоритетом является не абсолютная точность классификации, а повышение обоснованности управленческих решений. В этом контексте выявленное превосходство FRMS-подхода над нормативной моделью подтверждает необходимость перехода к риск-ориентированным методам управления усталостью.

На рисунке 2 видно, как распределён интегральный индекс усталости. Гистограмма демонстрирует положительную асимметрию с концентрацией значений в диапазоне низкого и среднего риска.

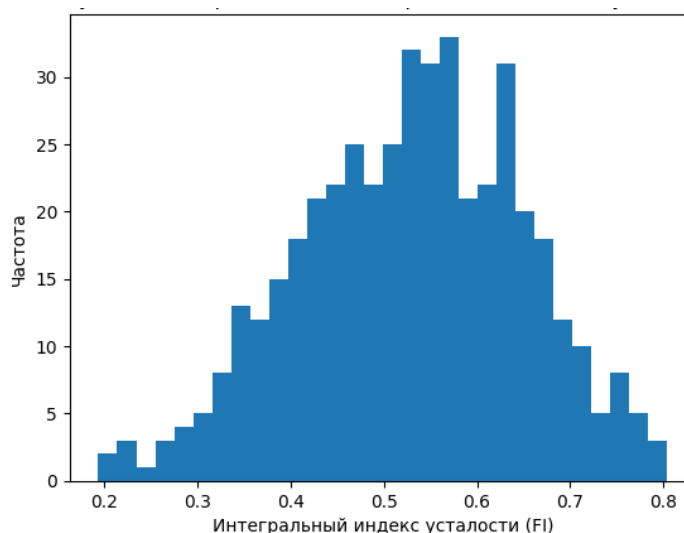


Рисунок 2 – Распределение интегрального индекса усталости

Количественные результаты распределения приведены в таблице 4: 52 % смен относятся к категории  $FI < 0,4$ , 37 % – диапазону  $0,4-0,7$  и 11 % – к зоне высокого риска ( $FI \geq 0,7$ ). Анализ хвостовой части распределения на рисунке 2 показывает, что высокие

значения FI в основном связаны с ночной нагрузкой более 3 часов, а вариабельность сердечного ритма снижается HRV ниже 45 мс.

Таблица 4 – Структура распределения интегрального индекса усталости (FI)

Диапазон значений FI	Категория риска	Доля смен, %
$FI < 0,4$	Низкий риск	52
$0,4 \leq FI < 0,7$	Умеренный риск	37
$FI \geq 0,7$	Высокий риск	11

Результаты имитационного моделирования представлены на рисунке 3, где показано смещение распределения FI при различных сценариях изменения расписания.

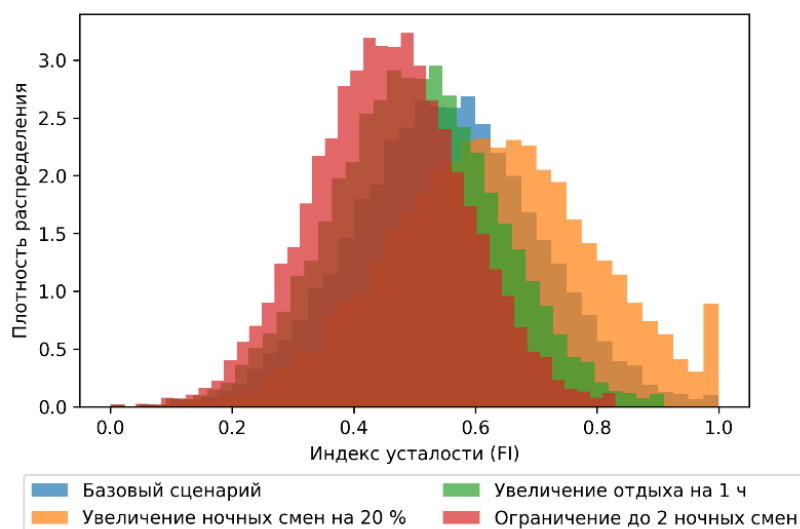


Рисунок 3 – Имитационное моделирование

Количественные изменения показаны в таблице 5, показывающий повышение доли ночных смен на 20% и приводящий к увеличению среднего показателя FI на 14% и повышению доли смен высокого риска на 8 процентных пунктов.

Таблица 5 – Результаты моделирования (моделирование методом Монте-Карло с N=10 000 сценариев)

Моделируемый сценарий	Изменение среднего значения интегрального индекса усталости (FI), %	Изменение доли смен с высоким уровнем риска ( $FI \geq 0,7$ ), %
Увеличение доли ночных смен на 20 %	+14%	+8 процентных пунктов
Увеличение минимального времени отдыха на 1 ч	-9%	-5 процентных пунктов
Ограничение не более двух последовательных ночных смен	-17%	-9 процентных пунктов

Кроме того, увеличение минимального времени отдыха на один час привело к снижению среднего балла по шкале FI на девять процентов. Самое большое влияние показало правило двух ночных смен подряд. Средний FI снизился на семнадцать процентов. Число людей в группе высокого риска уменьшилось на девять процентных пунктов. На

рисунке 3 наглядно показано, как распределение смещается в сторону высокого или низкого риска в зависимости от сценария. Изменения хорошо видны. Время для отдыха и число ночных смен сильно влияют на риск. Модель проверена на данных казахстанского перевозчика. Оказалось, что для международных рейсов средний FI выше на 18 % по сравнению с внутренними маршрутами. При этом 23 % ночных дальних рейсов имели  $FI \geq 0,7$ . Анализ корреляции показал сильную связь между FI и субъективной самооценкой усталости экипажем ( $r = 0,68$ ;  $p < 0,01$ ). Это свидетельствует о корректности и работоспособности модели. В итоге результаты модели согласуются с тем, что показано на рисунке 2, и подтверждают, что модель устойчива в перекрёстной проверке.

Вместе с тем результаты исследования следует интерпретировать с учётом ряда ограничений. Во-первых, анализ основан на агрегированных эксплуатационных данных, что ограничивает возможность учёта индивидуальных траекторий накопления усталости и межличностной вариабельности адаптационных механизмов. Во-вторых, физиологический компонент модели представлен единственным показателем (HRV), тогда как включение дополнительных биометрических параметров (например, показателей сна или уровня кортизола) могло бы повысить точность оценки. В-третьих, субъективные оценки усталости могут содержать элементы когнитивного искажения, несмотря на использование валидированных шкал. Кроме того, верификация модели проводилась на данных одной национальной авиационной системы, что может ограничивать её обобщаемость на другие операционные контексты. Наконец, в исследовании отсутствует непрерывный мониторинг в реальном времени, что ограничивает оценку динамики усталости в пределах смены.

Полученные результаты подтверждают положения ICAO [1] о необходимости перехода от строгого нормативного контроля к интегральной модели FRMS-подхода. Интегральная модель показала лучшую предсказуемость, чем простая модель FTL-only (AUC 0,623 против 0,574). Это значит, что обычные предписания рабочего времени недостаточны. Установлено, что ночная нагрузка и суммарное рабочее время являются значимыми факторами, что согласуется с выводами программы EASA FTL 2.0 [4,5] о роли циркадных факторов. Включение показателя HRV повысило чувствительность модели к индивидуальным особенностям адаптации, что соответствует современным нейрофизиологическим исследованиям. Моделирование показало, что ограничение ночных смен подряд может уменьшить общий показатель усталости на 17 процентов. Моделирование подтверждает рекомендации IATA [6] по использованию прогнозных инструментов при планировании графиков. Проверка данных национального перевозчика показала более высокий риск на международных и дальних маршрутах. Проверка отражает особенности авиации в Республике Казахстан. Итак, таблицы 2–5 и рисунки 1–3 показывают, что интегральная FRMS-модель дает более точные предсказания, чем нормативный FTL-подход. Интегральная FRMS-модель лучше. FTL-подход отстает. Интегральная FRMS-модель также позволяет измерять, как управленческие решения влияют на усталость экипажей в работе авиакомпаний Республики Казахстан. Все результаты подтверждают преимущество комплексного FRMS-подхода над нормативной моделью FTL. Комплексный FRMS-подход соответствует международным стандартам ICAO, IATA и EASA. Предложенная система оценки может послужить основой для внедрения превентивных мер по управлению усталостью в рамках национальной программы обеспечения безопасности полетов.

#### *Практические рекомендации по внедрению системы оценки усталости*

Исследование показывает, что управление усталостью экипажа невозможно осуществить с помощью одного подхода. Необходимы несколько мер: ограничение рабочего времени, прогнозирование усталости с использованием биоматематики и мониторинг физиологических показателей. Учитывая быстрое развитие гражданской авиации, внедрение системы управления рисками, связанными с усталостью (Fatigue Risk

Management System, FRMS), имеет особое значение. Эта система должна быть частью общей системы безопасности полетов каждой авиакомпании.

На основе полученных результатов следует определить несколько практических способов внедрения модели.

Наиболее важным является применение авиакомпаниями интегрального индекса усталости как дополнительного инструмента для контроля состояния экипажей при планировании полетных заданий. Этот индекс помогает учитывать не только продолжительность смены, но и суточные факторы, суммарную рабочую нагрузку и физиологические показатели.

Несомненно, что основной проблемой при внедрении системы является использование моделей прогнозирования усталости. Эти модели позволяют оценить потенциальную усталость экипажа на этапе планирования полета. Эти модели особенно важны для международных и дальнемагистральных рейсов, где пересечение нескольких часовых поясов и ночные смены значительно увеличивают риск усталости.

Технологии мониторинга могут повысить эффективность FRMS. В рамках системы устанавливаются датчики, измеряющие вариабельность сердечного ритма и другие биометрические данные. Эти показатели предоставляют точные данные о состоянии членов экипажа. В сочетании с оперативными данными мы можем более точно оценить усталость. Такой подход позволяет своевременно выявлять нарастание усталости.

Регулярный анализ статистических данных и проверка моделей являются важными элементами системы. Постоянный контроль уровня усталости и разбор собранных данных позволяют вовремя менять планы работы. При этом корректировка расписания осуществляется оперативно, что повышает эффективность управления персоналом.

Внедрение системы оценки усталости экипажа является важным этапом развития культуры безопасности в гражданской авиации. Эта система поможет перейти от реактивного управления к проактивному управлению рисками.

#### **Заключение.**

В данной статье выработана рекомендация по оценке уровня усталости экипажей авиакомпаний. Данная рекомендация основывается на международных нормах ICAO, IATA и EASA. Система учитывает и местные законы по безопасности полетов. Предложена модель интегрального индекса усталости (FI). Модель интегрального индекса усталости включает рабочие нормы, циркадные ритмы, общую нагрузку, показатели сердца и мнение экипажей. Данный способ даст больше контроля над усталостью и может сделать полеты безопаснее.

Статистика показала, что ночная нагрузка, недельная занятость и изменчивость сердечного ритма – главные признаки усталости. Ночная нагрузка, недельная занятость и изменчивость сердечного ритма действительно влияют на усталость. ROC-анализ показал, что интегральная FRMS-модель выигрывает у FTL-only. FRMS-модель предсказывает лучше и более сбалансирована, чем FTL-only. Моделирование показало, что уровень риска сильно реагирует на изменения в расписании. При ограничении последовательных ночных смен и увеличении времени отдыха наблюдается снижение уровня риска. Наиболее выраженный положительный эффект достигается при ограничении ночных смен и увеличении времени отдыха.

Результаты показывают, что стоит внедрять модель оценки усталости в FRMS авиакомпаний Республики Казахстан. Модель оценки усталости будет работать внутри FRMS. Реализация предложенных рекомендаций позволяет перейти от традиционного контроля соблюдения нормативов к управлению рисками человеческого фактора. Это способствует повышению надёжности системы обеспечения безопасности полетов и гармонизации национальной практики с международными требованиями. Отмечается, что внедрение данного подхода является обоснованным.

### Список литературы

1. International Civil Aviation Organization. (2020). Manual for the oversight of fatigue management approaches (Doc 9966) (2nd ed., ver. 2, revised). <https://www.icao.int/resources>.
2. JSC “Aviation Administration of Kazakhstan”. Safety Review of Civil Aviation in the Republic of Kazakhstan (for 2024).  
<https://caa.gov.kz/storage/app/media/Safety%20review%20for%202024.pdf>
3. JSC “Aviation Administration of Kazakhstan”. Kazakhstan Aviation Safety Plan (KASP) 2024–2027.  
<https://caa.gov.kz/storage/app/media/Kazakhstan%20Aviation%20Safety%20Plan%202024-2027.pdf>
4. European Union Aviation Safety Agency. Effectiveness of Flight Time Limitations (FTL 2.0): Performance of Data Collection (Deliverable 2.2). 25.03.2025.
5. European Union Aviation Safety Agency. Effectiveness of Flight Time Limitations (FTL 2.0): Research study materials/report. 02.08.2023.
6. International Air Transport Association. Fatigue Risk Management Systems (FRMS): White Paper 2025.  
[https://www.iata.org/contentassets/5f976bb3ca2446f3a40e88b18dd61fbb/frms\\_white-paper\\_2025.pdf](https://www.iata.org/contentassets/5f976bb3ca2446f3a40e88b18dd61fbb/frms_white-paper_2025.pdf)
7. Rodrigues T.E., Fischer F.M., Helene O., et al. (2023). Modelling the root causes of fatigue and associated risk factors in the Brazilian regular aviation industry // Safety Science. 2023. Vol. 157. Art. 105905. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105905.
8. Sun J., Liao Y., Lu F., Sun R.-S., Jia H.-B. (2023). Assessment of pilot fatigue risk on international flights under the prevention and control policy of the Chinese civil aviation industry during the COVID-19 // Journal of Air Transport Management. 2023. Vol. 112. Art. 102466. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102466.
9. Guo D., Wang C., Qin Y., et al. (2025). Assessment of flight fatigue using heart rate variability and machine learning approaches // Frontiers in Neuroscience. 2025. Vol. 19. Art. 1621638. DOI: 10.3389/fnins.2025.1621638.
10. Wen C.C.Y., Cherian D., Schenker M.T., Jordan A.S. (2023). Fatigue and Sleep in Airline Cabin Crew: A Scoping Review // Int. J. Environ. Res. Public Health. Vol. 20, No. 3. Art. 2652. DOI: 10.3390/ijerph20032652.
11. Sabaner E., Kolbakir F., Ercan E. (2022). Evaluation of fatigue and sleep problems in cabin crews during the early COVID-19 pandemic period // Travel Medicine and Infectious Disease. DOI: 10.1016/j.tmaid.2022.102430.
12. Jun-Ya S., et al. (2023). Pilot fatigue survey: A study of the mutual influence among fatigue factors in the work dimension // Frontiers in Public Health. doi: 10.3389/fpubh.2023.1014503.
13. Air Astana. Annual Report (2022).  
<https://ir.airastana.com/media/8dc25bd51ed3b83/annual-report-2022.pdf>

### ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ӘУЕКОМПАНИЯЛАРЫНДА ЭКИПАЖДАРДЫҢ ШАРШАУ ДЕҢГЕЙІН БАҒАЛАУ БОЙЫНША ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТТАРҒА СӘЙКЕС ҰСЫНЫСТАРДЫ ӘЗІРЛЕУ

*Аңдатпа.* Әуе тасымалы қарқындылығының артуы және түнгі әрі ұзақ қашықтықтағы рейстер үлесінің өсуі жағдайында экипаж шаршауын басқару ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз етудің аса маңызды факторына айналуға. Экипаж шаршауы ұшу операцияларының сенімділігіне және шешім қабылдау сапасына әсер ететін маңызды фактор ретінде қарастырылады. Сонымен қатар, жұмыс уақытына қойылатын дәстүрлі шектеулер шаршау тәуекелін толық бағалауға мүмкіндік бермейді, бұл кешенді тәсілдерді енгізу қажеттілігін айқындайды. Жүрек ырғағының вариабельділігін (HRV)

талдау және имитациялық модельдеу сияқты заманауи әдістер экипаждың функционалдық жағдайын неғұрлым дәл бағалауға және шаршаудың қалыптасу заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу мәселесі жұмыс уақытына негізделген нормативтік тәсілдің (FTL) шектеулілігінде, яғни оның адамның физиологиялық және циркадтық ерекшеліктерін ескермеуінде жатыр.

Зерттеудің мақсаты – ICAO, IATA және EASA халықаралық стандарттарына сәйкес келетін интегралдық модель негізінде Қазақстан Республикасы авиакомпаниялары экипаждарының шаршау деңгейін бағалау бойынша ұсынымдар әзірлеу. Зерттеу міндеттері халықаралық тәжірибені талдау, шаршаудың интегралдық индексінің математикалық моделін әзірлеу, оны статистикалық валидациялау және практикалық ұсынымдар қалыптастыруды қамтиды. Зерттеу әдістеріне көптік және логистикалық регрессия, ROC-талдау, сезімталдық пен ерекшелік көрсеткіштерін есептеу, Монте-Карло әдісімен имитациялық модельдеу және жүрек ырғағының варибельділігін (HRV) талдау кіреді.

Нәтижелер интегралдық FRMS-модельдің ( $AUC = 0,623$ ) нормативтік FTL-модельмен ( $AUC = 0,574$ ) салыстырғанда басымдылығын көрсетті. Имитациялық модельдеу рейстер кестесін оңтайландыру кезінде шаршау тәуекелінің 17%-ға дейін төмендейтінін дәлелдеді. Сонымен қатар, шаршау деңгейі, түнгі жүктеме және HRV көрсеткішінің төмендеуі арасында статистикалық мәнді байланыс анықталды. Зерттеу нәтижесінде Қазақстан Республикасы авиакомпанияларының ұшу қауіпсіздігін басқару жүйесіне интегралдық шаршау индексі енгізудің мақсатқа сәйкестігі негізделді. Ұсынылған тәсілдер шаршау тәуекелдерін проактивті басқаруға көшуге мүмкіндік береді және халықаралық талаптарға сәйкес келеді.

**Түйін сөздер:** экипаждың шаршауы, шаршау тәуекелдерін басқару, ұшу қауіпсіздігін басқару жүйесі, жұмыс уақытына қойылатын шектеулер, жүрек ырғағының варибельділігі, биоматематикалық модельдеуді талдау, авиациялық қауіпсіздік.

## DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR ASSESSING CREW FATIGUE LEVELS IN AIRLINES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL STANDARDS

**Abstract.** *In the context of increasing air traffic intensity and the growing proportion of night and long-haul flights, the management of crew fatigue is becoming a critically important factor in ensuring flight safety. Crew fatigue is recognized as a significant factor affecting the reliability of flight operations and decision-making processes. At the same time, traditional working time limitations do not provide a comprehensive assessment of fatigue-related risks, which necessitates the implementation of integrated approaches. Modern methods, including heart rate variability (HRV) analysis and simulation modeling, enable a more accurate assessment of the functional state of crew members and facilitate the identification of fatigue formation patterns. The research problem lies in the limitations of the prescriptive approach based on Flight Time Limitations (FTL), which does not account for physiological and circadian characteristics of humans.*

*The aim of this study is to develop recommendations for assessing crew fatigue levels in airlines of the Republic of Kazakhstan based on an integrated model consistent with international standards of ICAO, IATA, and EASA. The objectives include the analysis of international fatigue management approaches, the development of a mathematical model of the fatigue index, its statistical validation, and the formulation of practical recommendations. The research methods include multiple and logistic regression, ROC analysis, calculation of sensitivity and specificity, Monte Carlo simulation, and heart rate variability (HRV) analysis.*

*The results demonstrated the superiority of the integrated FRMS model ( $AUC = 0.623$ ) compared to the prescriptive FTL-based model ( $AUC = 0.574$ ). Simulation modeling showed a reduction in fatigue risk by up to 17% under optimized scheduling conditions. A statistically*

*significant relationship between fatigue, night workload, and decreased HRV was identified. It is concluded that the implementation of an integrated fatigue index within the safety management systems of airlines in the Republic of Kazakhstan is justified. The proposed recommendations enable a transition to proactive fatigue risk management and are consistent with international standards.*

**Keywords:** crew fatigue, fatigue risk management, safety management system, working time limitations, heart rate variability, biomathematical modeling analysis, aviation safety.

#### Сведение об авторах

Ермекбаев Муратбек Мадалиевич	К.т.н., PhD, профессор Алматинского университета энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, Казахстан E-mail: <a href="mailto:muratbek_72@mail.ru">muratbek_72@mail.ru</a>
Салмаков Жанибек Тулекович	Магистрант кафедры «Летная эксплуатация воздушных судов» Академии Гражданской Авиации, г. Алматы, Казахстан E-mail: <a href="mailto:salmakovzhanibek@gmail.com">salmakovzhanibek@gmail.com</a>

#### Авторлар туралы мәлімет

Ермекбаев Муратбек Мадалиевич	Т.ғ.к., PhD докторы, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және телекоммуникация университетінің, профессоры, Алматы қ., Қазақстан E-mail: <a href="mailto:muratbek_72@mail.ru">muratbek_72@mail.ru</a>
Салмаков Жанибек Тулекович	Азаматтық Авиация Академиясының «Әуе кемелерін ұшуды пайдалану» кафедрасының магистранты, Алматы қ., Қазақстан E-mail: <a href="mailto:salmakovzhanibek@gmail.com">salmakovzhanibek@gmail.com</a>

#### Information about the authors

Muratbek Ermekbaev	Candidate of Technical Sciences, PhD, Professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: <a href="mailto:muratbek_72@mail.ru">muratbek_72@mail.ru</a>
Zhanibek Salmakov	Master's student of Department "Flight Operations of Aircraft", Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan, E-mail: <a href="mailto:salmakovzhanibek@gmail.com">salmakovzhanibek@gmail.com</a>