

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_11

MPHTI 73.37.81

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ АВИАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ В ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ И ПОДДЕРЖКА ВЫБОРА РАБОЧИХ ДИАПАЗОНОВ ВЧ-РАДИОСВЯЗИ

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН АВИАЦИЯЛЫҚ ИНФРАҚҰРЫЛЫМҒА ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ: ҚОСАЛҚЫ БӨЛШЕКТЕРГЕ ҚАЖЕТТІЛІКТІ БОЛЖАУ ЖӘНЕ ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ЖЖ РАДИО ДИАПАЗОНДАРЫН ТАҢДАУДЫ ҚОЛДАУ

INTELLIGENT MAINTENANCE OF AVIATION INFRASTRUCTURE BASED ON A DIGITAL TWIN: FORECASTING THE NEED FOR SPARE PARTS AND SUPPORTING THE SELECTION OF OPERATING HF RADIO BANDS

М.Ю. Жиганбаев ^{1,2*}, М.Б. Амелов ³¹Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан²Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан³Институт транспорта и телекоммуникаций, г. Рига, Латвия

*Автор-корреспонденции: М.Ю. Жиганбаев, zhiganbayev@ionos.kz

Ключевые слова:

цифровой двойник,
техническое
обслуживание,
метеорологическое
оборудование,
прогнозирование
наличия запасных
частей, ионосфера,
высокочастотная
радиосвязь

АННОТАЦИЯ

В работе предложена архитектура цифрового двойника, предназначенная для поддержки принятия решений при эксплуатации и техническом обслуживании объектов авиационной инфраструктуры. В качестве первого практического примера рассмотрено прогнозирование потребности в запасных частях для аэродромного метеорологического оборудования на примере датчика видимости FD12/FD12P. Предложенный подход позволяет использовать эксплуатационные данные, сведения о техническом обслуживании и статистику отказов для оценки вероятности выхода из строя отдельных компонентов оборудования и формирования рекомендаций по планированию запасов.

Количественные результаты получены на пилотной выборке из 5 единиц оборудования FD12/FD12P за 2021-2024 гг. (240 месячных наблюдений) и характеризуют проверку применимости методики, а не завершённую промышленную валидацию.

Кроме того, в работе рассмотрен ионосферный сценарий как архитектурное расширение предложенного цифрового двойника для задач ВЧ-радиосвязи. Такая модель может использовать данные о состоянии ионосферы, значения f_oF_2 , $f_{min}F_2$ и геофизические индексы для предварительной оценки условий распространения



© 2026 М.Ю. Жиганбаев, М.Б. Амелов

Данная работа распространяется на условиях лицензии

Creative Commons «С указанием авторства» 4.0 Международная (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ВЧ-радиоволн и поддержки выбора рабочих диапазонов связи. Полная количественная проверка точности рекомендаций по ВЧ-частотам требует отдельного набора данных по фактическим радиотрассам и сеансам связи, поэтому рассматривается как направление дальнейших исследований.

Түйінді сөздер:

сандық егіздік,
техникалық қызмет
көрсету,
метеорологиялық
жабдықтар, қосалқы
бөлшектердің
қолжетімділігін болжау,
ионосфера, жоғары
жиілікті радиобайланыс.

ТҮЙІНДЕМЕ

Осы қолжазбада авиациялық инфрақұрылым объектілерін пайдалану және оларға техникалық қызмет көрсету кезінде шешім қабылдауды қолдауға арналған цифрлық егіз архитектурасы ұсынылады. Бірінші практикалық мысал ретінде FD12/FD12P көріну датчигі негізінде аэродромдық метеорологиялық жабдықтың қосалқы бөлшектеріне қажеттілікті болжау қарастырылады. Ұсынылған тәсіл жабдықтың жекелеген компоненттерінің істен шығу ықтималдығын бағалау және қорларды жоспарлау бойынша ұсынымдар қалыптастыру үшін пайдалану деректерін, техникалық қызмет көрсету жазбаларын және істен шығу статистикасын пайдалануға мүмкіндік береді.

Сандық нәтижелер 2021–2024 жылдары бақыланған FD12/FD12P үлгісіндегі 5 жабдық бірлігінен құралған пилоттық іріктемеге (240 айлық бақылау) негізделген және толық өнеркәсіптік валидацияны емес, әдістеменің қолданылуын бастапқы тексеруді сипаттайды.

Сонымен қатар, жұмыста жоғары жиілікті (HF) радиобайланыс міндеттері үшін ұсынылған цифрлық егіздің архитектуралық кеңеюі ретінде ионосфералық сценарий қарастырылады. Мұндай модель ионосфераның жай-күйі туралы деректерді, foF2 мәндерін, TEC/VTEC және геофизикалық индекстерді HF радиотолқындарының таралу жағдайларын алдын ала бағалау және байланыс жұмыс диапазондарын таңдауды қолдау үшін пайдалана алады. HF жиіліктері бойынша ұсынымдардың дәлдігін толық сандық тексеру нақты радиотрассалар мен байланыс сеанстары жөніндегі деректердің жеке жиынтығын талап етеді, сондықтан ол әрі қарайғы зерттеулер бағыты ретінде қарастырылады.

Keywords:

digital twin, maintenance,
meteorological equipment,
spare parts availability
forecasting, ionosphere,
high-frequency radio
communications.

ABSTRACT

The paper proposes a digital twin architecture intended to support decision-making in the operation and maintenance of aviation infrastructure facilities. As a first practical example, it considers forecasting spare-parts demand for aerodrome meteorological equipment using the FD12/FD12P visibility sensor as a case. The proposed approach uses operational data, maintenance records, and failure statistics to estimate the probability of failure of individual equipment components and to generate recommendations for inventory planning.

The quantitative results are based on a pilot sample of five FD12/FD12P units observed in 2021–2024 (240 monthly observations) and represent an assessment of the method's applicability rather than full-scale industrial validation.

In addition, the paper considers an ionospheric scenario as an architectural extension of the proposed digital twin for HF radio communication tasks. This model can use ionospheric state data, foF2 values, TEC/VTEC, and geophysical indices to preliminarily assess HF radio-wave propagation conditions and support the selection of operating communication ranges. Full quantitative validation of the accuracy of HF-frequency recommendations requires a separate dataset of actual radio paths and communication sessions; therefore, it is considered as a direction for future research.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в гражданской авиации активно развивается концепция цифрового двойника (ЦД), применяемая для мониторинга состояния бортовых систем, силовых установок и ключевых компонентов воздушных судов. В таких решениях используются телеметрические данные, прогнозная аналитика и модели надежности, позволяющие поддерживать процессы технического обслуживания, прогнозировать остаточный ресурс компонентов и снижать вероятность внеплановых отказов (Bisanti et al., 2023; Airbus, 2025; Aviation Business News, 2025).

Концепция цифрового двойника исторически связана с представлением о связанной паре «физический объект – виртуальная модель», между которыми обеспечивается регулярный обмен данными (Grieves & Vickers, 2016). В современных исследованиях цифровой двойник рассматривается не только как виртуальная копия объекта, но и как аналитическая система поддержки решений, объединяющая данные эксплуатации, диагностические признаки, модели прогнозирования и интерфейсы для пользователя (Hu et al., 2021; Iliuta et al., 2024).

В авиационной сфере основное внимание в исследованиях по цифровым двойникам уделяется воздушному судну и его подсистемам: двигателям, планеру, авионике, системам управления полетом и отдельным агрегатам. В таких работах цифровые двойники применяются для прогнозирования остаточного срока службы, планирования технического обслуживания и управления запасными частями в рамках процессов MRO (Li et al., 2021; Bisanti et al., 2023; Chia et al., 2024; Kabashkin et al., 2024). Однако наземная авиационная инфраструктура, включая аэродромное метеорологическое оборудование, радиотехнические средства и среду распространения радиоволн, изучена в этом контексте значительно меньше.

Между тем отказ или нестабильная работа элементов авиационной инфраструктуры также может влиять на безопасность и регулярность полетов. Для аэродромного метеорологического оборудования особенно важны точность и непрерывность предоставления данных о видимости, осадках и других метеорологических параметрах. Для удаленных, горных и труднодоступных районов дополнительное значение имеет надежность ВЧ-радиосвязи, в том числе в резервных, аварийных и поисково-спасательных сценариях. Поэтому методы цифрового двойника могут быть полезны не только для воздушных судов, но и для инфраструктурных объектов, обеспечивающих полеты.

Анализ существующих работ показывает, что три направления обычно рассматриваются отдельно: цифровые двойники авиационных систем, модели прогнозного технического обслуживания и модели ионосферных условий для ВЧ-радиосвязи. Недостаточно проработан вопрос о том, как объединить эксплуатационные данные, журналы технического обслуживания, складские параметры и радиофизические данные в единой архитектуре поддержки решений для наземной авиационной инфраструктуры. Именно этот пробел определяет направление настоящего исследования.

Целью работы является разработка и обоснование унифицированной архитектуры цифрового двойника для поддержки эксплуатации и технического обслуживания авиационной инфраструктуры. В отличие от подходов, ориентированных преимущественно на воздушное судно, предлагаемая архитектура рассматривает в качестве объектов цифрового двойника наземное метеорологическое оборудование и радиофизическую среду, влияющую на работу ВЧ-радиосвязи.

Основной количественный пример в статье связан с аэродромным метеорологическим оборудованием, в частности с датчиком видимости FD12/FD12P. В рамках данного примера рассматривается связь между телеметрией оборудования,

журналами технического обслуживания, событиями отказов и замен, а также параметрами складской логистики. Такой подход позволяет перейти от общего описания цифрового двойника к пилотному расчетному сценарию, в котором могут быть оценены риск отказа компонентов, прогноз потребности в запасных частях и эффективность различных политик управления запасами.

Второй пример относится к построению цифровой модели ионосферных условий над районом авиационных операций. Данный пример рассматривается как архитектурное расширение предложенного подхода для задач ВЧ-радиосвязи. Модель использует данные ионосферного зондирования, значения TEC/VTEC и геофизические индексы для формирования рекомендаций по выбору рабочих диапазонов ВЧ-связи. При этом полная количественная валидация прогноза MUF/FOT и надежности связи рассматривается как отдельное направление дальнейших исследований.

На программном уровне взаимодействие модулей предусматривается через общий интеграционный слой и сервисный контур цифрового двойника. Метеорологический модуль формирует оценку риска отказа FD12/FD12P и прогноз потребности в запасных частях, а ионосферный модуль — оценку условий распространения ВЧ-радиоволн и предварительные рекомендации по рабочим диапазонам. Результаты двух модулей не объединяются в одну расчетную модель и не являются автоматическими управляющими командами, в предлагаемой архитектуре предусматривается их вывод в единый пользовательский интерфейс как двух независимых информационных потоков поддержки решений для технического и оперативного персонала.

Научный вклад статьи состоит в следующем. Во-первых, предложена единая архитектура цифрового двойника для наземной авиационной инфраструктуры, включающая уровни физического объекта, данных, моделей, сервисов и пользовательского интерфейса. Во-вторых, показана схема применения этой архитектуры к задаче прогнозирования потребности в запасных частях для аэродромного метеорологического оборудования. В-третьих, предложен протокол оценки, включающий описание данных, разметку событий отказов и замен, выбор моделей прогнозирования и метрики качества. В-четвертых, показана возможность расширения архитектуры на задачу поддержки ВЧ-радиосвязи с учетом ионосферных условий.

Для уточнения научного вклада в таблице 1 представлено сопоставление настоящей работы с существующими исследованиями по цифровым двойникам, прогнозному техническому обслуживанию и моделированию ионосферных условий.

Таблица 1. Сопоставление настоящей работы с существующими исследованиями

Источник	Основной объект исследования	Основная задача	Ограничение относительно настоящей работы	Отличие настоящей работы
Bisanti et al. (2023)	воздушное судно и его системы	обзор цифровых двойников для технического обслуживания и эксплуатации	акцент на воздушных судах и IoT-архитектуре	перенос цифрового двойника на наземную авиационную инфраструктуру
Chia et al. (2024)	конструкция планера	прогнозирование состояния и структурная диагностика	объектом является планер воздушного судна	объектом анализа является аэродромное метеорологическое оборудование

Окончание таблицы 1

Источник	Основной объект исследования	Основная задача	Ограничение относительно настоящей работы	Отличие настоящей работы
Moenck et al. (2024)	производство и ТОиР воздушных судов	вызовы и возможности цифровых двойников в MRO	основное внимание уделено авиационному производству и ТОиР воздушных судов	цифровой двойник используется для связи риска отказа оборудования и потребности в запасных частях
Werbińska-Wojciechowska (2024)	транспортные системы	систематический обзор цифровых двойников для эксплуатации и обслуживания	обзорный характер без прикладного авиационного сценария FD12/FD12P	предложен пилотный расчетный сценарий для аэродромного оборудования
Kabashkin (2025)	авиационная техника	онтологическая модель цифрового двойника для обслуживания	акцент на семантическом и онтологическом уровне	настоящая работа фокусируется на расчетной схеме, данных ТО, отказах и запасных частях
Wang et al. (2022)	ВЧ-радиосвязь	обзор методов выбора рабочих частот	задача рассматривается отдельно от цифрового двойника авиационной инфраструктуры	ионосферный сценарий включен как архитектурное расширение единого цифрового двойника
Данная работа	аэродромное метеорологическое оборудование и ионосферная среда	поддержка ТОиР, прогноз запасных частей и архитектурная поддержка выбора ВЧ-диапазонов	пилотный характер количественной проверки	объединение наземного оборудования, складской логистики и ионосферного сценария в единой архитектуре
Примечание – составлено авторами				

Таким образом, научная новизна работы состоит не только в применении цифрового двойника к отдельному объекту, а в переносе данной концепции с воздушного судна на наземную авиационную инфраструктуру и в объединении двух разнородных сценариев прогнозирования запасных частей и поддержки ВЧ-радиосвязи – в единой архитектурной схеме.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании предложенная архитектура цифрового двойника рассматривается на двух прикладных сценариях авиационной инфраструктуры. Основной количественный сценарий связан с аэродромным метеорологическим оборудованием и прогнозированием потребности в запасных частях. Второй сценарий относится к использованию ионосферных данных для поддержки выбора рабочих диапазонов ВЧ-радиосвязи и рассматривается как архитектурное расширение предложенного подхода.

Взаимодействие функциональных модулей и общих программных слоев показано на рисунке 1.



Рисунок 1. Взаимодействие функциональных модулей в архитектуре цифрового двойника авиационной инфраструктуры

Примечание – разработано авторами

1. Объект исследования и источники данных для метеорологического оборудования

В качестве основного объекта исследования рассматривается аэродромный датчик видимости и текущей погоды семейства FD12/FD12P, работающий по принципу прямого рассеяния. Согласно технической документации Vaisala, данный тип оборудования используется для измерения метеорологического оптического диапазона (МОД), определения типа и интенсивности осадков, а также формирования информации о текущей погоде для авиационных метеорологических сообщений SYNOP/METAR (Vaisala, 2001). В рамках цифрового двойника FD12/FD12P рассматривается не только как измерительный прибор, но и как технический актив, состояние которого может быть связано с риском отказа, потребностью в техническом обслуживании и наличием запасных частей.

Такой подход соответствует современному пониманию цифрового двойника как аналитического инструмента поддержки технического обслуживания, оценки риска отказов и управления ресурсами в авиационном ТОиР (Bisanti et al., 2023; Moenck et al., 2024; Werbińska-Wojciechowska, 2024). В отличие от цифровых двойников, ориентированных преимущественно на воздушное судно и его бортовые системы, в данной работе объектом анализа выступает наземное метеорологическое оборудование, обеспечивающее эксплуатационную готовность аэродромной инфраструктуры.

Для построения пилотного набора данных используются три группы источников: эксплуатационные и диагностические данные оборудования, журналы технического обслуживания, а также складские и закупочные записи по запасным частям. Пилотный набор данных сформирован на основе обезличенных эксплуатационных записей, журналов технического обслуживания и обобщенных сведений о запасных частях. Пилотный характер исследования означает, что данные использованы для проверки структуры методики, протокола валидации и применимости риск-ориентированного подхода, но не рассматриваются как полная промышленная валидация цифрового двойника.

Эксплуатационные и диагностические данные включают:

- значения МОД;
- коды текущей погоды;
- тип и интенсивность осадков;
- предупреждения и аварийные сообщения;
- состояние нагревателя;
- признаки загрязнения оптического блока;
- диагностические параметры оборудования.

Данные технического обслуживания включают:

- даты профилактических проверок;
- даты очистки оптических элементов;
- даты калибровки;
- записи о неисправностях;
- сведения о ремонте;
- сведения о замене модулей или компонентов.

Складские и закупочные данные включают:

- перечень запасных частей;
- наличие запасных частей на складе;
- даты заявок и заказов;
- сроки поставки;
- фактические даты получения;
- стоимость или условную приоритетность запасной части.

Единицей наблюдения в пилотном наборе данных является один прибор FD12/FD12P за один расчетный период. Для задач прогнозирования запасных частей данные агрегируются по месячному интервалу. Такой интервал выбран потому, что решения по закупке и поддержанию складского запаса обычно принимаются не по минутной телеметрии, а по накопленным эксплуатационным признакам, событиям технического обслуживания и истории замен. Связь между прогнозированием технического состояния, риском отказа и планированием запасных частей соответствует подходам, применяемым в цифровых двойниках для задач авиационного ТОиР и логистики запасных частей (Moenck et al., 2024; Mustafa, 2025).

Таблица 2. Структура пилотного набора данных
для цифрового двойника FD12/FD12P

Группа данных	Примеры переменных	Расчетный интервал	Назначение в модели
Эксплуатационные данные	МОД, коды погоды, тип осадков, интенсивность осадков	1 месяц	Описание условий эксплуатации
Диагностические данные	предупреждения, аварии, загрязнение оптики, состояние нагревателя	1 месяц	Формирование признаков риска
Данные ТО	очистка, калибровка, ремонт, замена компонентов	событие / 1 месяц	Разметка отказов и замен
Складские данные	наличие запчастей, сроки поставки, даты заказов	1 месяц	Оценка риска дефицита
Логистические параметры	средний срок поставки, минимальный запас, точка повторного заказа	1 месяц	Расчет политики управления запасами
Примечание – составлено авторами			

2. Формирование событий отказов и замен

На основе журналов технического обслуживания и записей о неисправностях формируются события двух типов:

- событие отказа – зафиксированная неисправность, повлиявшая на работоспособность оборудования или потребовавшая ремонта;
- событие замены – фактическая замена компонента или модуля, например оптического блока, нагревателя, электронного модуля или другого элемента.

Для каждого компонента рассчитывается возраст на момент наблюдения, то есть время с момента установки или последней замены. Если точная дата установки компонента отсутствует, используется дата последнего известного обслуживания или дата начала периода наблюдения. Такие случаи отдельно отмечаются как восстановленные данные, чтобы не смешивать их с полностью подтвержденными событиями.

Целевая переменная для модели риска отказа определяется как бинарный признак:

$Y = 1$, если в течение следующего прогнозного горизонта произошел отказ или замена компонента;

$Y = 0$, если в течение следующего прогнозного горизонта отказ или замена не зафиксированы.

В качестве прогнозного горизонта в пилотном сценарии принимается 90 дней. Такой горизонт соответствует практической задаче предварительного планирования запасных частей и позволяет учитывать срок поставки компонентов.

3. Формирование признаков

Для каждого прибора и каждого расчетного месяца формируется набор признаков, отражающих техническое состояние оборудования, условия эксплуатации и историю обслуживания. К основным признакам относятся:

- возраст оборудования;
- возраст конкретного компонента после последней замены;
- количество предупреждений за месяц;
- количество аварийных сообщений за месяц;
- количество очисток оптики за период;
- наличие признаков загрязнения оптического блока;
- количество дней с осадками;
- средняя и максимальная интенсивность осадков;
- количество включений или длительность работы нагревателя;
- количество внеплановых работ по техническому обслуживанию;
- наличие аналогичных отказов за предыдущие периоды.

Для прогнозирования потребности в запасных частях дополнительно формируется временной ряд фактических замен или списаний запасных частей по каждому типу компонента. Если фактический расход запасных частей в отдельные месяцы отсутствует, значение принимается равным нулю. Это позволяет учитывать нерегулярный характер спроса, типичный для запасных частей технического оборудования.

4. Модели оценки риска отказа

Для оценки вероятности отказа компонента в течение прогнозного горизонта используются два уровня моделей.

Базовая модель основана на возрасте компонента и исторической частоте отказов. Она используется как простой ориентир и отражает практику планирования на основе прошлого опыта.

Предлагаемая модель цифрового двойника дополнительно учитывает диагностические и эксплуатационные признаки: количество предупреждений, признаки загрязнения оптики, состояние нагревателя, интенсивность осадков и историю технического

обслуживания. В пилотном сценарии для этого может использоваться логистическая регрессия или модель случайного леса. Выбор таких моделей обусловлен их интерпретируемостью и применимостью к небольшим наборам эксплуатационных данных.

Результатом модели является вероятность отказа компонента в течение заданного горизонта: P (failure within 90 days).

Полученная вероятность используется не как автоматическое решение о замене, а как диагностический индикатор для инженера и входной параметр для расчета потребности в запасных частях.

5. Модели прогнозирования потребности в запасных частях

Прогноз потребности в запасных частях строится на основе двух подходов.

Первый подход является базовым и использует историческое среднее потребление запасной части за предыдущие периоды. Он соответствует простой практике планирования, когда ожидаемый расход определяется по прошлым заменам.

Второй подход является риск-ориентированным и использует результаты модели цифрового двойника. Ожидаемая потребность в запасной части рассчитывается с учетом количества установленных компонентов, их возраста, диагностических признаков и вероятности отказа в прогнозном горизонте. В общем виде ожидаемый спрос может быть представлен как сумма вероятностей отказа по оборудованию, где используется соответствующий компонент.

Для сравнения моделей применяются следующие метрики:

- MAE – средняя абсолютная ошибка прогноза спроса;
- RMSE – среднеквадратическая ошибка прогноза;
- MAPE – относительная ошибка прогноза, если фактический спрос не равен нулю;
- количество месяцев с дефицитом запасной части;
- уровень обеспеченности запасом.

6. Оценка политики управления запасами

На следующем этапе прогноз потребности связывается с задачей управления запасами. Для каждой запасной части задаются следующие параметры:

- текущий остаток на складе;
- минимально допустимый запас;
- средний срок поставки;
- прогнозируемый спрос на период поставки;
- страховой запас.

В качестве базовой практики рассматривается планирование по историческому среднему расходу. В качестве предлагаемого подхода рассматривается риск-ориентированная точка повторного заказа, при которой заявка на закупку формируется не только по фактическому остатку, но и по прогнозируемому риску отказа компонентов.

Для оценки эффекта сравниваются следующие показатели:

- количество случаев дефицита;
- количество дней или месяцев без доступной запасной части;
- средний уровень запаса;
- уровень обеспеченности запасной частью;
- количество избыточных заказов.

Такой подход позволяет оценить не только точность прогноза, но и практическое влияние цифрового двойника на планирование запасных частей.

7. Валидация

Для проверки работоспособности предложенного подхода данные делятся на обучающую и тестовую части по времени. Более ранний период используется для настройки моделей, а более поздний период — для проверки качества прогноза. Такой

способ разделения выбран потому, что в эксплуатационных задачах важно прогнозировать будущие события на основе прошлых данных, а не случайно перемешивать наблюдения.

Валидация проводится по следующей схеме:

1. Формирование месячного набора данных по каждому прибору;
2. Разметка событий отказов и замен;
3. Расчет признаков технического состояния и условий эксплуатации;
4. Обучение базовой модели и модели цифрового двойника;
5. Прогноз риска отказа и потребности в запасных частях на тестовом периоде;
6. Сравнение прогнозов с фактическими заменами;
7. Расчет метрик качества и показателей складской обеспеченности.

Для повышения воспроизводимости использовалась следующая схема валидации. Пилотный набор данных включал 5 единиц оборудования FD12/FD12P за период 2021–2024 гг. При месячной агрегации было сформировано 240 расчетных наблюдений. Данные за 2021–2023 гг. использовались как обучающая выборка, а данные за 2024 г. — как тестовая выборка. Таким образом, проверка выполнялась по временному принципу: модель обучалась на более ранних данных и проверялась на последующем периоде.

В качестве базовой модели использовалась модель, учитывающая возраст компонента и историческую частоту отказов. В качестве модели цифрового двойника использовалась классификационная модель, учитывающая возраст компонента, количество предупреждений, признаки загрязнения оптики, работу нагревателя, количество дней с осадками, историю внепланового обслуживания и сведения о предыдущих отказах. Для пилотного сценария применялась модель случайного леса с ограниченной глубиной деревьев, что позволило учитывать нелинейные связи между диагностическими признаками и риском отказа без чрезмерного усложнения модели.

Ожидаемая потребность в запасной части рассчитывалась как сумма индивидуальных вероятностей отказа компонентов, связанных с данной запасной частью, в пределах прогнозного горизонта 90 дней. Если для запасной части k установлено n соответствующих компонентов, а модель оценивает вероятность отказа каждого компонента как p_i , то ожидаемый спрос определялся как: $D_k = \sum p_i, i = 1...n$.

Точка повторного заказа определялась с учетом прогнозируемого спроса на период поставки, текущего складского остатка и страхового запаса. Это позволило сравнить обычное планирование по историческому среднему расходу с риск-ориентированным подходом цифрового двойника.

8. Ионосферный сценарий для поддержки ВЧ-радиосвязи

Второй сценарий рассматривается как архитектурное расширение предложенного подхода на радиофизическую среду, влияющую на ВЧ-радиосвязь. В этом случае объектом моделирования является ионосферный слой над регионом авиационных операций, а основными источниками данных являются параметры ионосферного зондирования, значения foF_2 , $TEC/VTEC$ и геофизические индексы солнечной и магнитной активности.

Для региона Алматы могут использоваться данные ионосферной станции Alma-Ata, включая значения критической частоты слоя F2 (foF_2), а также индекс солнечной активности F10.7. Ранее такие данные применялись для анализа долгосрочных изменений и трендов foF_2 над Alma-Ata за период 1957–2018 гг. (Gordiyenko et al., 2014; Gordiyenko et al., 2025). Анализ таких данных показывает, что значения foF_2 связаны с солнечной активностью и зависят от сезона и времени суток, что делает их пригодными для включения в информационный слой цифрового двойника радиофизической среды.

В отличие от основного сценария по метеорологическому оборудованию, ионосферный сценарий в настоящей работе не рассматривается как полностью валидированная модель выбора частот. Его задача состоит в демонстрации того, что та же

архитектурная схема «объект – данные – модели – сервисы – интерфейс» может быть применена к радиофизической среде.

Для данного сценария могут использоваться следующие данные:

- значения foF2 по данным ионосферной станции Alma-Ata;
- значения TEC/VTEC по данным GNSS-наблюдений;
- солнечный индекс F10.7;
- геомагнитные индексы Kp, Ap, AE и SYM-H;
- локальное время, сезон и геометрия предполагаемой радиотрассы.

Для ионосферного сценария в настоящей работе задается не полный расчетный эксперимент, а протокол последующей количественной проверки. Такой подход позволяет определить, какие данные и метрики необходимы для перехода от архитектурного описания к валидированной модели поддержки выбора рабочих диапазонов ВЧ-радиосвязи.

Таблица 3. Протокол возможной количественной проверки ионосферного модуля

Элемент проверки	Используемые данные	Расчетный результат	Возможная метрика проверки
Оценка состояния ионосферы	foF2, TEC/VTEC, F10.7, Kp, Ap	характеристика текущих условий распространения ВЧ-радиоволн	совпадение с наблюдаемыми изменениями foF2 и TEC/VTEC
Оценка рабочих диапазонов	foF2, время суток, сезон, параметры радиотрассы	предварительный диапазон частот для ВЧ-связи	ошибка прогноза MUF/FOT при наличии контрольных данных
Оценка неблагоприятных условий связи	геомагнитные индексы, TEC/VTEC, данные космической погоды	предупреждение о возможном ухудшении условий ВЧ-связи	доля совпадений с фактическими ухудшениями связи
Проверка применимости для авиации	фактические радиотрассы и сеансы ВЧ-связи	оценка надежности связи в выбранном диапазоне	доля успешных сеансов связи, уровень доступности канала
<i>Примечание – составлено авторами</i>			

Таким образом, ионосферный модуль в текущей статье рассматривается как подготовленный к последующей валидации компонент цифрового двойника. Его полная количественная проверка требует отдельного набора данных, включающего фактические радиотрассы, рабочие частоты, время сеансов связи, успешность установления связи и рассчитанные значения MUF/FOT.

На этапе предварительной обработки данные очищаются от выбросов, агрегируются по выбранному временному интервалу и синхронизируются по общей временной шкале. Для учета солнечной активности может использоваться регрессионная связь между foF2 и индексом F10.7, а для анализа долгосрочной изменчивости — сезонное и суточное разделение данных.

Для физико-эмпирической оценки условий распространения ВЧ-радиоволн могут использоваться модель IRI и рекомендации ITU-R P.533 по прогнозированию

характеристик ВЧ-радиолиний (IRI Working Group, 2016; ITU-R, 2019). В качестве дополнительных источников методической основы могут рассматриваться работы по выбору рабочих частот для ВЧ-радиосвязи и применению сервисов космической погоды в гражданской авиации (Wang et al., 2022; Kauristie et al., 2021).

Результатом ионосферного модуля является не автоматический выбор рабочей частоты, а информационный сервис, который может предоставлять оператору оценку состояния ионосферы, ожидаемые изменения условий распространения ВЧ-радиоволн и предварительные рекомендации по рабочим диапазонам. Полная количественная проверка точности прогноза MUF/FOT и надежности ВЧ-связи требует отдельного набора радиотрасс, фактических сеансов связи и специализированной процедуры валидации, поэтому рассматривается как направление дальнейшей работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования представлены в двух частях. В первой части рассматривается пилотный сценарий для аэродромного метеорологического оборудования FD12/FD12P, связанный с прогнозированием риска отказа и потребности в запасных частях. Во второй части обсуждается возможность расширения предложенной архитектуры на ионосферный сценарий поддержки ВЧ-радиосвязи.

1. Пилотный набор данных FD12/FD12P

Для проверки предложенного подхода был сформирован пилотный набор данных на основе обезличенных эксплуатационных записей датчиков видимости и текущей погоды FD12/FD12P, журналов технического обслуживания и обобщенных сведений о запасных частях.

Таблица 4. Характеристика пилотного набора данных

Показатель	Значение
Тип оборудования	FD12/FD12P
Количество единиц оборудования	5
Период наблюдения	2021–2024 гг.
Расчетный интервал	1 месяц
Количество расчетных наблюдений	240
Количество событий отказа	19
Количество событий замены компонентов	24
Рассматриваемые компоненты	оптический блок, нагреватель, электронный модуль, блок питания
Средний срок поставки запасной части	45 дней
Прогнозный горизонт	90 дней
Примечание – составлено авторами	

Основная задача пилотного сценария состояла в оценке того, позволяет ли цифровой двойник связать техническое состояние оборудования с потребностью в запасных частях. В отличие от традиционного подхода, основанного только на среднем историческом расходе, предложенный подход учитывает возраст компонентов, количество предупреждений, признаки загрязнения оптики, работу нагревателя, интенсивность осадков и историю технического обслуживания. Такая логика соответствует современному представлению о цифровом двойнике как об аналитическом инструменте технического обслуживания и управления ресурсами, а не только как о виртуальном отображении физического объекта (Moenck et al., 2024; Werbińska-Wojciechowska, 2024).

2. Результаты оценки риска отказа

На первом этапе была выполнена оценка риска отказа компонентов в горизонте 90 дней. В качестве базового подхода использовалась модель, основанная на возрасте компонента и исторической частоте отказов. В качестве модели цифрового двойника использовалась модель, дополнительно учитывающая диагностические и эксплуатационные признаки.

Дополнительно для проверки классификационной части модели была построена матрица ошибок на тестовой выборке 2024 г. Тестовая выборка включала 60 месячных наблюдений. В ней фиксировались случаи, когда в течение прогнозного горизонта 90 дней происходил отказ или замена компонента.

Таблица 5. Матрица ошибок базовой модели на тестовой выборке

	Фактический отказ/замена	Фактического отказа/замены нет
Прогноз: отказ/замена	3	4
Прогноз: отказа/замены нет	7	46
Примечание – составлено авторами		

На основе данной матрицы общая точность базовой модели составила 0,82, точность положительного прогноза – 0,43, полнота выявления отказов – 0,30, F1-мера – 0,35.

Таблица 6. Матрица ошибок модели цифрового двойника на тестовой выборке

	Фактический отказ/замена	Фактического отказа/замены нет
Прогноз: отказ/замена	6	3
Прогноз: отказа/замены нет	4	47
Примечание – составлено авторами		

На основе данной матрицы общая точность модели цифрового двойника составила 0,88, точность положительного прогноза – 0,67, полнота выявления отказов – 0,60, F1-мера – 0,63. По сравнению с базовой моделью цифровой двойник лучше выявляет потенциальные отказы, что особенно важно для задач планирования запасных частей и предотвращения дефицита критически важных компонентов.

Таблица 7. Сравнение моделей оценки риска отказа

Модель	Используемые признаки	Accuracy (общая точность)	Precision (точность положительного прогноза)	Recall (полнота выявления отказов)	F1-score (мера)
Базовая модель	возраст компонента, историческая частота отказов	0,82	0,43	0,30	0,35
Модель цифрового двойника	возраст, предупреждения, загрязнение оптики, нагреватель, осадки, история ТО	0,88	0,67	0,60	0,63
Примечание – составлено авторами					

Результаты показывают, что включение диагностических и эксплуатационных признаков повышает качество выявления компонентов с повышенным риском отказа. Особенно заметно улучшение по показателю recall: модель цифрового двойника выявила 60% потенциальных отказов против 30% у базового подхода. Это важно для задач технического обслуживания, поскольку пропуск потенциального отказа может привести к задержке ремонта и отсутствию необходимой запасной части.

Наиболее информативными признаками в пилотном сценарии оказались количество предупреждений за месяц, признаки загрязнения оптического блока, возраст компонента после последней замены и количество внеплановых работ по техническому обслуживанию.

3. Результаты прогнозирования потребности в запасных частях

На втором этапе была оценена потребность в запасных частях. Сравнивались два подхода: базовое планирование по историческому среднему расходу и риск-ориентированное планирование на основе цифрового двойника.

Таблица 8. Сравнение качества прогноза потребности в запасных частях

Подход	MAE	RMSE	MAPE
Историческое среднее потребление	0,72	0,91	38%
Риск-ориентированная модель цифрового двойника	0,46	0,62	24%
Примечание – составлено авторами			

Сравнение показывает, что риск-ориентированный подход уменьшил среднюю абсолютную ошибку прогноза с 0,72 до 0,46 единицы запасной части на расчетный период. Это связано с тем, что модель цифрового двойника учитывает не только прошлые замены, но и текущее техническое состояние оборудования. Такой подход особенно полезен для запасных частей с нерегулярным спросом, когда фактические замены происходят редко, но отсутствие нужной детали может увеличить время восстановления оборудования. Связь между прогнозированием отказов и управлением запасными частями соответствует направлению исследований по применению цифровых двойников в авиационном ТОиР и логистике запасных частей (Moenck et al., 2024; Mustafa, 2025).

4. Влияние на управление запасами

Для оценки практического эффекта прогноз потребности был связан с политикой управления запасами. Рассматривались текущий остаток на складе, средний срок поставки, минимальный запас, страховой запас и точка повторного заказа. Базовая практика сравнивалась с риск-ориентированной политикой, при которой решение о закупке учитывает прогнозируемую вероятность отказа компонентов.

Таблица 9. Сравнение складских показателей

Подход	Количество случаев дефицита	Средний запас	Уровень обеспеченности запасом
Базовая практика	7	2,4	83 %
Риск-ориентированная политика цифрового двойника	3	2,7	93 %
Примечание – составлено авторами			

В пилотном сценарии риск-ориентированная политика позволила сократить количество случаев дефицита запасных частей с 7 до 3 при умеренном увеличении среднего

уровня запаса с 2,4 до 2,7 единицы. Уровень обеспеченности запасом увеличился с 83 % до 93 %. Это показывает, что цифровой двойник может использоваться не только как диагностический инструмент, но и как элемент поддержки складской логистики.

Если риск отказа компонента возрастает, а срок поставки запасной части превышает допустимое время восстановления оборудования, система может заранее указать на необходимость пополнения запаса. Таким образом, связь между техническим состоянием оборудования и складскими параметрами становится более явной и управляемой. Такой подход согласуется с работами, в которых цифровые двойники рассматриваются как инструмент управления жизненным циклом технических активов и поддержки решений в транспортной инфраструктуре (Li et al., 2025; Wu et al., 2025).

5. Обсуждение архитектурной переносимости

Пилотный сценарий FD12/FD12P показывает, что предложенная архитектура может объединять физический объект, эксплуатационные данные, модели оценки риска, складские параметры и пользовательский сервис поддержки решений. На архитектурном уровне это подтверждает возможность применения структуры «физический объект – данные – модели – сервисы – интерфейс» для задач технического обслуживания наземной авиационной инфраструктуры.

Применение одной архитектурной основы к разным типам объектов соответствует платформенно-ориентированным и стекоориентированным подходам к проектированию цифровых двойников, где общая структура сохраняется, а конкретные модели и источники данных адаптируются под предметную область (Durão et al., 2024; McKee et al., 2023; Kenfack et al., 2024). В отличие от большинства авиационных сценариев, ориентированных на воздушное судно и его бортовые системы, в настоящей работе акцент переносится на наземную авиационную инфраструктуру: метеорологическое оборудование и радиофизическую среду ВЧ-связи.

Главное отличие предлагаемого подхода от традиционного планирования состоит в том, что запасные части рассматриваются не изолированно от технического состояния оборудования. Напротив, потребность в запасной части связывается с вероятностью отказа конкретных компонентов, условиями эксплуатации и историей технического обслуживания. Это соответствует современному представлению о цифровом двойнике как об аналитическом сервисе поддержки решений, а не только как о виртуальной копии физического объекта (Moenck et al., 2024; Werbińska-Wojciechowska, 2024).

6. Ионосферный сценарий и ВЧ-радиосвязь

Второй сценарий показывает, что та же архитектурная логика может быть распространена на радиофизическую среду, влияющую на ВЧ-радиосвязь. В этом случае объектом цифрового двойника является не технический прибор, а ионосферная среда над регионом авиационных операций. Входными данными могут служить значения foF2, TEC/VTEC, индекс F10.7, геомагнитные индексы и параметры предполагаемой радиотрассы.

Для региона Алматы могут использоваться данные ионосферной станции Alma-Ata, включая значения критической частоты слоя F2 и индекс солнечной активности F10.7. Ранее такие данные применялись для анализа долгосрочных изменений и трендов foF2 над Alma-Ata, а также для изучения ионосферных условий Центральной Азии (Gordiyenko et al., 2014; Gordiyenko et al., 2025).

В отличие от сценария FD12/FD12P, ионосферный сценарий в настоящей работе не рассматривается как полностью валидированная модель выбора частот. Его результатом является архитектурная схема информационного сервиса, который может предоставлять оценку состояния ионосферы, ожидаемые изменения условий распространения ВЧ-радиоволн и предварительные рекомендации по рабочим диапазонам.

Существующие рекомендации ИКАО и региональные документы по ВЧ-связи описывают принципы планирования и назначения семейств ВЧ-частот, а глобальные службы космической погоды предоставляют предупреждения о неблагоприятных ВЧ-условиях (ICAO, 2010; ICAO, 2020; Kauristie et al., 2021). В перспективе ионосферный модуль цифрового двойника может быть реализован как гибридная модель, объединяющая физико-эмпирические методы прогнозирования распространения ВЧ-радиоволн и методы анализа данных. Физико-эмпирический уровень может использовать модели IRI и рекомендации ITU-R P.533 для предварительной оценки условий распространения радиоволн, а аналитический уровень — данные foF2, TEC/VTEC, F10.7 и геомагнитные индексы для уточнения прогноза в конкретном регионе и временном окне. После накопления данных по фактическим радиотрассам и сеансам ВЧ-связи такая модель может быть проверена по ошибке прогноза MUF/FOT, доле успешных сеансов связи и уровню доступности канала. Это позволит перейти от архитектурного описания ионосферного модуля к его количественной проверке на реальных данных ВЧ-радиосвязи.

Таким образом, ионосферный сценарий подтверждает расширяемость предложенной архитектуры, но требует отдельной количественной валидации. Это ограничение важно учитывать при интерпретации результатов.

7. Ограничения исследования

Несмотря на полученные результаты, исследование имеет ряд ограничений.

Во-первых, пилотный сценарий FD12/FD12P основан на ограниченном наборе обезличенных эксплуатационных записей. Для повышения надежности выводов необходимо расширить набор данных за счет большего числа приборов, более длительного периода наблюдений и более полного учета фактических замен компонентов. Во-вторых, часть событий технического обслуживания может быть восстановлена по журналам и не всегда содержит полную информацию о причине отказа. Поэтому в дальнейшем необходимо унифицировать разметку событий: отдельно фиксировать отказ, предупреждение, профилактическую замену и замену после фактической неисправности. В-третьих, ионосферный сценарий в данной работе рассматривается как архитектурное расширение, а не как завершенная система выбора ВЧ-частот. Полная проверка точности прогноза MUF/FOT, надежности ВЧ-связи и применимости рекомендаций для поисково-спасательных операций требует отдельного исследования.

В-четвертых, в настоящей работе не рассматриваются вопросы кибербезопасности, сертификации, интеграции с эксплуатационными информационными системами и доверия персонала к рекомендациям цифрового двойника. В исследованиях по цифровым двойникам авиационной и транспортной инфраструктуры подчеркивается, что такие системы требуют согласованных данных, объяснимых моделей, киберустойчивости и организационного принятия пользователями (Kabashkin, 2025; Moenck et al., 2025; Werbińska-Wojciechowska, 2024; Wu et al., 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложена унифицированная архитектура цифрового двойника для поддержки эксплуатации и технического обслуживания наземной авиационной инфраструктуры. В отличие от большинства исследований, ориентированных преимущественно на воздушное судно и его бортовые системы, в настоящей работе акцент перенесен на инфраструктурные объекты: аэродромное метеорологическое оборудование и радиофизическую среду, влияющую на условия ВЧ-радиосвязи.

На архитектурном уровне предложена структура «физический объект или среда – данные – модели – сервисы – интерфейсы». Такая структура может использоваться для

объединения эксплуатационных данных, диагностических признаков, журналов технического обслуживания, складских параметров и сервисов поддержки решений. Это соответствует современному подходу к цифровому двойнику как к аналитическому инструменту, а не только как к виртуальному отображению физического объекта (Durão et al., 2024; Moenck et al., 2024; Werbińska-Wojciechowska, 2024).

Основной количественный сценарий был рассмотрен на примере аэродромного датчика видимости и текущей погоды FD12/FD12P. В пилотном наборе обезличенных эксплуатационных записей были объединены диагностические признаки оборудования, события технического обслуживания, отказы и замены компонентов, а также сведения о запасных частях и сроках поставки. Полученные результаты показали, что риск-ориентированный подход позволяет связать техническое состояние оборудования с прогнозированием потребности в запасных частях.

В пилотном сценарии модель цифрового двойника, учитывающая возраст компонентов, предупреждения, признаки загрязнения оптики, работу нагревателя, условия эксплуатации и историю технического обслуживания, показала более высокие значения метрик по сравнению с базовым подходом, основанным только на возрасте компонентов и исторической частоте отказов. Кроме того, риск-ориентированное планирование запасов позволило сократить количество случаев дефицита запасных частей и повысить уровень обеспеченности запасом при умеренном увеличении среднего складского остатка. Эти результаты показывают, что предложенная архитектура может быть использована как основа для перехода от реактивного обслуживания к более риск-ориентированному планированию технического обслуживания и запасных частей.

Второй сценарий был связан с применением той же архитектурной логики к ионосферной среде, влияющей на ВЧ-радиосвязь. В этом случае цифровой двойник рассматривается как информационный сервис, который может использовать значения f_oF_2 , TEC/VTEC, индекс F10.7, геомагнитные индексы и параметры радиотрассы для оценки состояния ионосферы и предварительной поддержки выбора рабочих диапазонов ВЧ-связи. Однако данный сценарий в настоящей работе не рассматривается как полностью валидированная система выбора частот. Его количественная проверка требует отдельного набора данных по фактическим радиотрассам, сеансам связи, значениям MUF/FOT и показателям надежности связи.

Основные ограничения исследования связаны с ограниченным характером пилотного набора данных, частично восстановленными событиями технического обслуживания, отсутствием полного онтологического слоя, а также тем, что вопросы кибербезопасности, сертификации, интеграции с эксплуатационными информационными системами и доверия персонала к рекомендациям цифрового двойника не рассматривались детально. Эти ограничения не позволяют рассматривать полученные результаты как завершенную промышленную валидацию, но позволяют использовать их как основу для дальнейшего прикладного исследования.

Дальнейшая работа должна быть направлена на проверку предложенного подхода на расширенных эксплуатационных данных с нескольких аэродромов, уточнение разметки отказов и замен компонентов, сравнение различных моделей прогнозирования, интеграцию онтологического слоя и оценку практического влияния цифрового двойника на процессы технического обслуживания и складской логистики. Для ионосферного сценария необходима отдельная количественная проверка на реальных или исторических данных по ВЧ-радиосвязи, включая фактические радиотрассы и показатели надежности связи.

Таким образом, предложенная архитектура объединяет два независимых функциональных модуля через общий интеграционный слой, сервисный уровень и единый пользовательский интерфейс. Модуль FD12/FD12P поддерживает оценку риска

отказа и планирование потребности в запасных частях, а ионосферный модуль — оценку условий распространения и выбор рабочих ВЧ-диапазонов. Количественно в настоящей работе проверен только пилотный сценарий FD12/FD12P, ионосферный модуль представлен как архитектурное расширение и требует отдельной валидации на данных фактических радиотрасс и сеансов связи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26104545 «Долгосрочные вариации критических частот слоя F2 над Алматы в период 1957–2017 гг. Проверка модели ионосферы IRI для Казахстанского региона»).

ЗАЯВЛЕНИЕ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОГО ЭТИЧЕСКОГО СОВЕТА: Институциональный этический совет Институт ионосферы, Академия Гражданской Авиации, Институт транспорта и телекоммуникаций подтвердил, что для данного исследования не требуется этического одобрения, так как работа носит технический/теоретический характер, не включает участие людей или использование животных, а также не содержит персональных данных. В работе использованы обезличенные эксплуатационные записи технического характера.

ЗАЯВЛЕНИЕ О ПОЛУЧЕНИИ ИНФОРМИРОВАННОГО СОГЛАСИЯ: В данном исследовании не принимали участие люди, поэтому получение информированного согласия не требовалось.

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ: В исследовании использован пилотный набор данных, сформированный на основе обезличенных эксплуатационных записей и обобщенных сведений о техническом обслуживании. Полные эксплуатационные записи не размещаются в открытом доступе в связи с требованиями конфиденциальности и ограничениями доступа к эксплуатационной информации. Обобщенные результаты, использованные для проверки методики, представлены в тексте статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abedin, B., Meske, C., Junglas, I., & others. (2022). Designing and managing human-AI interactions. *Information Systems Frontiers*, 24, 691–697.
- Airbus. (2025). Digital twins: Accelerating innovation in aerospace from design to operations. Airbus Press Centre. <https://www.airbus.com>
- Aviation Business News. (2025). Digital twins: Improving efficiency in maintenance, repair, and overhaul operations. <https://www.aviationbusinessnews.com>
- Bisanti, G. M., Mainetti, L., Montanaro, T., Patrono, L., & Sergi, I. (2023). Digital twins for aircraft maintenance and operations: A systematic literature review and IoT-enabled modular architecture. *Internet of Things*, 24, 100991. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100991>
- Chia, J. W. Y., Verhagen, W. J. C., Silva, J. M., Heiets, I., Kuo, Y. W., & Cole, I. (2024). A review and outlook on airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 820–842. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.09.024>
- Durão, L. F. C. S., Zancul, E., & Schützer, K. (2024). Digital twin data architecture for product-service systems. *Procedia CIRP*, 121, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.232>
- Gordiyenko, G. I., Vodyannikov, V. V., Yakovets, A. F., & Litvinov, Yu. G. (2014). Long-term trend of the F2-layer critical frequency observed at the Alma-Ata ionospheric station. *Earth, Planets and Space*, 66, 125. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-125>
- Gordiyenko, G., Arian, F., Litvinov, Yu., & Zhiganbaev, M. (2025). Ionospheric response to the extreme geomagnetic storm of 10–11 May 2024 based on total electron content

- observations in Central and East Asia. *Atmosphere*, 16(7), 854. <https://doi.org/10.3390/atmos16070854>
- Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Origins of the digital twin concept. In F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Advances in manufacturing*. ResearchGate preprint. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- Hu, W., Zhang, T., Deng, S., Liu, C., & Tan, J. (2021). Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2(1), 1–34. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2020-010>
- ICAO. (2010). Guidance material for HF frequency management (ISPACG HF GM, Version 1.0). International Civil Aviation Organization.
- ICAO. (2020). Frequency management and high-frequency spectrum in the NAT Region. International Civil Aviation Organization.
- Iliuță, M. E., Bălan, M. C., Ionuț, A., & Popescu, D. (2024). Digital twin: A review of the evolution from concept to industrial applications. *Applied Sciences*, 14(13), 5454. <https://doi.org/10.3390/app14135454>
- IRI Working Group. (2016). International Reference Ionosphere 2016 (IRI-2016). <https://iri.gsfc.nasa.gov/>
- ITU-R. (2019). Recommendation ITU-R P.533-14: Method for the prediction of the performance of HF circuits. International Telecommunication Union.
- Kabashkin, I. (2024). Digital twin framework for data-driven aircraft lifecycle management. *Mathematics*, 12(19), 2979. <https://doi.org/10.3390/math12192979>
- Kabashkin, I. (2025). Ontology-based digital twin model for aircraft maintenance and operations. *Mathematics*, 13(17), 2817. <https://doi.org/10.3390/math13172817>
- Kauristi, K., Andries, J., Beck, P., et al. (2021). Space weather services for civil aviation—Challenges and solutions. *Remote Sensing*, 13(18), 3685. <https://doi.org/10.3390/rs13183685>
- Kenfack, R., Gogineni, S., & Geisert, C. (2024). Development of digital twins for smart product-service systems: A methodological approach demonstrated using fuel cells. In *Proceedings of the 35th Symposium Design for X (DfX 2024)*. <https://doi.org/10.35199/dfx2024.21>
- Lee, J., & Wang, J. (2025). Digital twin-based management strategies for logistics transportation systems. *Scientific Reports*, 15, 12186. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96641-z>
- Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2022). Digital twin in aerospace industry: A gentle introduction. *IEEE Access*, 10, 9543–9562. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136458>
- Li, Y., Xu, Y., Wang, H., et al. (2025). High-frequency skywave communication for air-ground networks: A cooperative transmission framework. *Chinese Journal of Aeronautics*, 38(5). <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.10.001>
- Mackie, D., et al. (2023). Platform stack architectural framework: An introductory guide. Digital Twin Consortium. <https://www.digitaltwinconsortium.org>
- Moenk, C., Koch, J., Rath, J. E., Büsch, L., Gierker, J., Köhler, F., Schüppstuhl, T., & Schöpflin, D. (2025). Industry 5.0 in aircraft manufacturing and MRO: Challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s13272-025-00832-3>
- Mönk, C., Rath, J. E., Koch, J., Wendt, A., Kalschoyer, F., Schüppstuhl, T., & Schöpflin, D. (2024). Digital twins in aircraft manufacturing and maintenance: Challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y>
- Mudzindwa, S., & Chawanda, A. (2018). Radio-wave propagation prediction for HF communications. *Communications*, 6(1), 5–12. <https://doi.org/10.11648/j.com.20180601.12>
- Mustafa, M. A. S. (2025). Predictive optimization of spare-parts management in aircraft fleets using AI, IoT and digital twin technologies. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 4(3), 218–236. <https://doi.org/10.56578/jemse040305>

- Vaisala. (2001). FD12P weather sensor: User's guide. Vaisala Oyj.
- Wang, J., Shi, Y., Yang, C., & Feng, F. (2022). Review and prospects of operating-frequency selection methods for HF radio communication. *Advances in Space Research*, 69(8), 2989–2999. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.01.026>
- Wierzbinska-Wojciechowska, S. (2024). A digital twin approach for transport system operation and maintenance: A systematic review. *Sensors*, 24(18), 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>
- Wu, D., Zheng, A., Yu, W., Cao, H., Lin, C., Liu, C., & Zhou, D. (2025). Digital twin technology in transportation infrastructure: A comprehensive review of current applications, challenges, and future directions. *Applied Sciences*, 15(4), 1911. <https://doi.org/10.3390/app15041911>

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Жиғанбаев Мұрат – техника ғылымдарының магистрі, Азаматтық авиация академиясы, Алматы қ., Қазақстан
Жиганбаев Мурат – магистр технических наук, Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан
Zhiganbayev Murat – Master of Technical Sciences, Academy of civil aviation, Almaty, Kazakhstan,
e-mail: zhiganbayev@ionos.kz ,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9250-182X> ,



Амелов Мұрат – техника ғылымдарының магистрі, Телекоммуникация және көлік Институты, Рига қ., Латвия
Амелов Мурат – магистр технических наук, Институт транспорта и телекоммуникаций, г. Рига, Латвия
Amelov Murat – Master of Technical Sciences, Transport and Telecommunication Institute, Riga, Latvia
e-mail: amelov@ans.kz ,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4043-4858>