**Анализ вероятности задержек авиарейсов: влияние погоды, технических факторов и перегрузки аэропорта** ***Бояров Вячеслав Васильевич и Стрелкова Александра Александровна.
студенты кафедра №3 “истории и управления персоналом”
группа УПОВТ 24-01
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени А.А. Новикова
Россия, Санкт-Петербург, 2025***

 **Анализ вероятности задержек авиарейсов: влияние погоды, технических факторов и перегрузки аэропорта**

**Оглавление**

* **Введение**
* **Влияние погодных условий на задержки авиарейсов**
* 2.1. Основные погодные факторы
* 2.2. Статистика задержек из-за погоды
* **Технические факторы задержек**
* 3.1. Типы технических неисправностей
* 3.2. Статистика задержек по техническим причинам
* **Перегрузка аэропортов и логистические проблемы**
* 4.1. Основные причины перегрузки
* 4.2. Статистика задержек из-за перегруженности аэропортов
* **Динамика задержек авиарейсов за последние 50 лет**
* 5.1. Глобальная статистика
* 5.2. Изменение причин задержек со временем
* **Вероятностный анализ задержек**
* 6.1. Методы анализа
* 6.2. Пример расчёта ожидаемой задержки
* **Способы снижения задержек**
* **Заключение**

**1. Введение**

Задержки авиарейсов – одна из ключевых проблем современной авиации, влияющая на пассажиропоток, экономику авиакомпаний и репутацию аэропортов. Основными причинами сбоев расписания являются погодные условия, технические неисправности воздушных судов и перегруженность аэропортов.

Цель данной статьи – проанализировать вероятность задержек рейсов в зависимости от этих факторов, рассмотреть динамику за последние 50 лет и предложить методы минимизации задержек.

Задержки авиарейсов можно формализовать как случайную величину, зависящую от множества факторов. Введем следующие обозначения:

D - общая задержка рейса
Dw -задержка из-за погоды
Dt -задержка из-за погоды
Da -задержка из-за перегрузки аэропорта

​

Тогда:

D=Dw+Dtt+Da+ϵ где: ϵ - случайная составляющая.

**2. Влияние погодных условий на задержки авиарейсов**

**2.1. Основные погодные факторы**

* **Туман и низкая облачность** – ухудшают видимость, что затрудняет взлёт и посадку.
* **Гроза и сильный ветер** – могут привести к перенаправлению рейсов или временной остановке полётов.
* **Обильные осадки (снег, дождь, град)** – требуют дополнительной обработки ВПП, увеличивая время обслуживания.
* **Обледенение** – необходимость антиобледенительной обработки задерживает вылет.

**2.2. Статистика задержек из-за погоды**

По данным FAA [[1]](#footnote-1)(Федеральное управление гражданской авиации Россия):

* **1970–1980:** ~76% задержек связаны с погодой.
* **1990–2000:** ~50% (улучшение метеопрогнозирования).
* **2010–2020:** ~40–45% (рост других факторов, таких как перегрузка аэропортов).
* **2020–2023:** ~35% (снижение из-за пандемии и уменьшения трафика).
* **Пример:** В аэропорту Шереметьево (Москва) зимние задержки из-за снегопадов составляют **до 30% от общего числа**.

Статистика и вероятностные модели.

*Статистика* - отрасль знаний, наука, в которой излагаются общие вопросы сбора, измерения, мониторинга, анализа массовых статистических (количественных или качественных) данных и их сравнение; изучение количественной стороны массовых общественных явлений в числовой форме.
Эмпирические данные показывают, что задержки из-за погоды подчиняются экспоненциальному распределению:

P(Dw>t)=e-P(D w ​ >t)=e-λwt

где λw - интенсивность погодных нарушений.
Для аэропорта Шереметьево:

λw = 0.02 мин⁻¹ (зимой)
Средняя задержка: E[Dw] = 1/λw = 50мин
Вероятность задержки более 1 часа:
P(Dw>60) = e-0.02x60 ≈ 0.30

**3. Технические факторы задержек**

**3.1. Типы технических неисправностей**

* Отказ двигателя.
* Проблемы с шасси.
* Неисправности электроники.

**3.2. Статистика задержек по техническим причинам**

По данным IATA[[2]](#footnote-2):

* **1970–1980:** ~25% задержек (низкая надёжность старых самолётов).
* **1990–2000:** ~15–20% (улучшение технологий).
* **2010–2020:** ~10–15% (внедрение predictive maintenance).
* **2020–2023:** ~8–12% (использование AI для диагностики).

**Среднее время задержки:**

* 1970-е: **3–6 часов**.

2020-е: **1–3 часа**.

Математическое моделирование отказов

Используем распределение Вейбулла для времени между отказами:
F(t)=1-e-(t/a)^β. Эта формула представляет собой функцию распределения Вейбулла (Weibull cumulative distribution function, CDF). Она широко используется в теории надежности, анализе выживаемости и моделировании времени до отказа. **Параметры:**

1. **t*t*** — время (или другая непрерывная переменная).
2. **a*a*** (масштабный параметр, a>0*a*>0) — характерное время, при котором функция достигает определенного уровня. Иногда обозначается как λ*λ* или η*η*.
3. **β*β*** (формальный параметр, β>0*β*>0) — определяет форму распределения:
	* Если β<1*β*<1: интенсивность отказов уменьшается со временем (например, "приработка" устройств).
	* Если β=1*β*=1: распределение сводится к экспоненциальному (постоянная интенсивность отказов).
	* Если β>1*β*>1: интенсивность отказов растет со временем (например, старение материалов).

#### Смысл:

* F(t)*F*(*t*) — вероятность того, что отказ произойдет до момента времени t*t*.
* 1−F(t)=e−(ta)β1−*F*(*t*)=*e*−(*at*​)*β* — вероятность "выживания" (отсутствия отказа) до времени t*t*.

где:
α=1000 часов (характеристическое время)
β=1.5 (параметр формы)
Вероятность отказа в течение 10-часового полета:
P(t≤10)=1-e-(10/1000)^1.5≈ 0.015
Вероятность отказа в течение 10-часового полета:

**4. Перегрузка аэропортов и логистические проблемы**

**4.1. Основные причины перегрузки**

* Нехватка ВПП[[3]](#footnote-3).
* Ограниченная пропускная способность терминалов.
* Проблемы с наземным обслуживанием.

**4.2. Статистика задержек из-за перегруженности аэропортов из источников FAA (Федеральное управление гражданской авиации)[[4]](#footnote-4)[[5]](#footnote-5)**

* **1970–1980:** ~15% (низкая плотность трафика).
* **1990–2000:** ~25% (рост числа рейсов).
* **2010–2020:** ~30–35% (рекордные пассажиропотоки).
* **2020–2023:** ~20–25% (временное снижение из-за COVID-19).

**Примеры:**

* **Хитроу (Лондон):** средняя задержка в час пик – **40–60 минут**.
* **Домодедово (Москва):** задержки до **2 часов** в вечернее время.
* Моделируем аэропорт как систему M/M/k:
λ=20 рейсов/час - интенсивность входящего потока
μ=6 рейсов/час - интенсивность обслуживания
k=4 - количество ВПП

Вероятность очереди:

Pqueue -(t/a)^β=P0
где P0**-** вероятность свободной системы
Для Хитроу (k=2, λ = 45 λ=45, μ = 30 μ=30):
Pqueue ≈ 0.65

**5. Динамика задержек авиарейсов за последние 50 лет**

5.1. Глобальная статистика по данным FAA

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Период | Среднее время задержки (мин) | Основная причина |
| 1970-1980 | 45-60 | Погода 60% |
| 1980-1990 | 40-55 | Погода (50)% + техника(25%) |
| 1990-2000 | 30-50 | Перегрузка аэропортов (30%) |
| 2000-2010 | 25-45 | Перегрузка (35%) + погода (40%) |
| 2010-2020 | 20-40 | Перегрузка (40%) + логистика |
| 2020-2023 | 15-30 | COVID-19 + восстановление трафика |

**5.2. Изменение причин задержек со временем**

* **1970-е:** Доминируют погодные факторы.
* **1990-е:** Рост влияния перегрузки аэропортов.
* **2020-е:** Комбинация всех факторов + пандемийные ограничения.

**6. Вероятностный анализ задержек**

**6.1. Методы анализа**

* Регрессионный анализ - набор [статистических методов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B) исследования влияния одной или нескольких [независимых переменных](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%8F_%D0%B8_%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5) X1,X2,...,XpX на [зависимую переменную](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%8F_%D0%B8_%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5) Y Y. Независимые переменные иначе называют регрессорами или предикторами, а зависимые переменные — критериальными или регрессантами. Терминология *зависимых* и *независимых* переменных отражает лишь математическую зависимость переменных (*см.*[*Корреляция*](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D1%8F)[[6]](#footnote-7)), а не причинно-следственные отношения. Наиболее распространённый вид регрессионного анализа — линейная регрессия, когда находят линейную функцию, которая, согласно определённым математическим критериям, наиболее соответствует данным. Например, в методе наименьших квадратов вычисляется прямая (или гиперплоскость), сумма квадратов отклонений между которой и данными минимальна.
* Метод Монте-Карло - это гибкий, но точный подход к имитации миграции фотонов. В этом методе локальные правила миграции фотонов представлены как распределения вероятностей, которые описывают размер шага движения фотона между точками взаимодействия с тканью и углы, на которые отклоняется траектория движения фотона при рассеянии. Этот метод эквивалентен моделированию миграции фотонов с помощью аналитического [уравнения переноса излучения](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%B8_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%84%D1%83%D0%B7%D0%B8%D0%B8_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0_%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2_%D0%B2_%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D1%82%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B8.) (УПИ[[7]](#footnote-8)), которое описывает движение фотонов с помощью дифференциальных уравнений. Тем не менее, аналитические решения УПИ часто получить невозможно; для некоторых геометрических форм [диффузионное приближение](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%B8_%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%84%D1%83%D0%B7%D0%B8%D0%B8_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0_%D1%84%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2_%D0%B2_%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D1%82%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B8.) может быть использовано для упрощения УПИ, хотя это, в свою очередь, вносит много неточностей, особенно вблизи источников и границ. В то же время моделирование методом Монте-Карло можно сделать сколь угодно точным путём увеличения количества фотонов.
* Машинное обучение - класс методов [искусственного интеллекта](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82), характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение за счёт применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства [математической статистики](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0), [численных методов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B), [математического анализа](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7), [методов оптимизации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%28%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%29), [теории вероятностей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%BE%D1%8F%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%B9), [теории графов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%8F_%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%BE%D0%B2), различные техники работы с [данными в цифровой форме](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%28%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0%29).

Различают два типа обучения:

1. [*Обучение по прецедентам*](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%BF%D0%BE_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%86%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BC), или *индуктивное обучение*, основано на выявлении [эмпирических закономерностей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BC%D0%BF%D0%B8%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) в [данных](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%8B%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BA%D0%B0).
2. *Дедуктивное обучение* предполагает формализацию знаний экспертов и их перенос в компьютер в виде [базы знаний](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B0_%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9).

Дедуктивное обучение принято относить к области [экспертных систем](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0), поэтому термины *машинное обучение* и *обучение по прецедентам* можно считать синонимами.

**6.2. Пример расчёта ожидаемой задержки**

Если в аэропорту:

* Вероятность плохой погоды – **20%** (+60 мин).
* Вероятность технической неисправности – **10%** (+90 мин).
* Вероятность перегрузки – **30%** (+30 мин).

**Общая ожидаемая задержка:**E(Delay)=0.2×60+0.1×90+0.3×30=12+9+9=30 мин

Используем копулу для моделирования зависимостей:
F(Dw ,Dt ,Da )=C(Fw(Dw),Ft (Dt ),Fa (Da ))
где C - функция копулы

**Пример расчета**
**Для рейса при:**
P(Dw>30)=0.4
P(Dt>30)=0.1
P(Da>30)=0.3

**Вероятность задержки >30 мин по любой причине:
P(D>30)=1−(1−0.4)(1−0.1)(1−0.3)≈0.62**

**7. Способы снижения задержек**

* **Улучшение метеомониторинга** (AI, спутниковые данные).
* **Оптимизация технического обслуживания** (предиктивная аналитика).
* **Расширение инфраструктуры аэропортов** (smart-диспетчеризация).
* **Гибкое управление расписанием** (динамические слоты).

**8. Заключение**

За последние 50 лет структура задержек авиарейсов изменилась:

* **1970–1990:** Доминировала погода.
* **2000–2020:** Роль перегрузки аэропортов выросла.
* **2020-е:** Комплексное влияние всех факторов.

**Перспективы:** Внедрение AI и автоматизации может сократить задержки на **20–30%** в ближайшие 5 лет.

***Список источников информации:***

1. **Федеральное управление гражданской авиации (FAA)**

Официальный сайт: <https://www.faa.gov/>
*Статистика задержек, отчёты по влиянию погоды и перегрузки аэропортов (1970–2023).*

1. **Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA)**

Официальный сайт: <https://www.iata.org/>
*Данные по техническим неисправностям, глобальные тренды задержек.*

1. **Международная организация гражданской авиации (ICAO)**

Официальный сайт: <https://www.icao.int/>
*Методологии анализа надёжности и стандарты безопасности.*

1. **Boeing Commercial Airplanes**

Отчёт: *"Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents"* (2022)
*Анализ отказов авиатехники и их влияние на расписание.*

1. **Eurocontrol**

Исследование: *"Weather Impact on Air Traffic"* (2021)
*Моделирование задержек из-за погодных условий в Европе.*

1. **NASA Aviation Safety Reporting System (ASRS)**

База данных: <https://asrs.arc.nasa.gov/>
*Кейсы технических сбоев и человеческого фактора.*

1. **Книга: "Applied Probability and Stochastic Processes" (Richard F. Bass, 2019)**
*Теоретические основы вероятностных моделей (экспоненциальное распределение, метод Монте-Карло).*
2. **Статья: "Weibull Analysis in Reliability Engineering" (ReliaSoft, 2020)**
*Применение распределения Вейбулла для прогнозирования отказов.*
3. **Отчёт Всемирного банка: "Airport Capacity and Demand Management" (2018)**
*Анализ перегрузки аэропортов (Хитроу, Домодедово, JFK).*
4. **Исследование MIT: "Machine Learning for Flight Delay Prediction" (2023)**
*Использование ИИ для минимизации задержек.*

1. https://www.faa.gov/air\_traffic/publications/internationalnotices/intl\_1\_20007-russia-federation.html [↑](#footnote-ref-1)
2. IATA (International Air Transport Association) - это международная ассоциация авиакомпаний, основанная в 1945 году. Она занимается разработкой стандартов, практик и процедур в авиационной отрасли, а также играет важную роль в определении тарифов на авиаперевозки. [↑](#footnote-ref-2)
3. ВПП (Взлётно-посадочная полоса) - это определенный участок аэродрома, предназначенный для посадки и взлёта самолётов. ВПП может быть грунтовой или искусственной (например, асфальтированной). [↑](#footnote-ref-3)
4. https://www.faa.gov/data\_research [↑](#footnote-ref-4)
5. https://www.faa.gov/airports/airport\_safety/airportdata [↑](#footnote-ref-5)
6. **Корреля́ция** (от [лат.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *correlatio* «соотношение»), или **корреляцио́нная зави́симость** — [статистическая](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0) взаимосвязь двух или более [случайных величин](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B0%D0%B9%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%BD%D0%B0) (либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми), при этом изменения значений одной или нескольких из этих величин сопутствуют систематическому изменению значений другой или других величин [↑](#footnote-ref-7)
7. **Уравне́ние перено́са излуче́ния** — одно из основных уравнений теории [звёздных](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B2%D0%B5%D0%B7%D0%B4%D0%B0) [фотосфер](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0). [↑](#footnote-ref-8)