



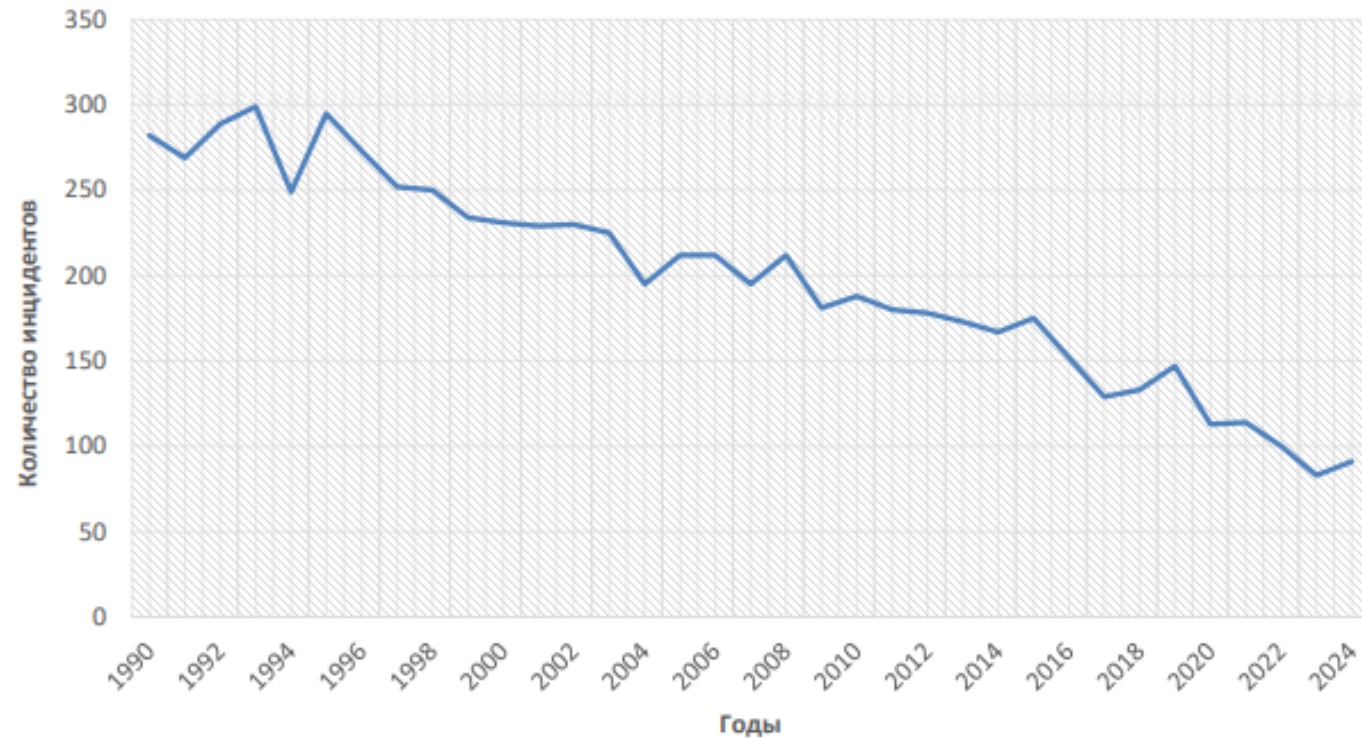
**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
«(национальный исследовательский университет)»**

**Выпускная квалификационная работа  
«Моделирование причинно-следственных связей в задаче анализа  
авиационных происшествий»**

**Выполнила студентка группы: МЗО-414Б-21  
Домникова Екатерина Артемовна  
Руководитель: к.т.н, доцент, доцент каф. 307  
Маркарян Анна Оганесовна**

# Актуальность проблемы

- Анализ авиационных происшествий требует новых подходов и инструментов.
- Отсутствие моделей и систем поддержки принятия решения при установлении причин авиационных происшествий.
- **Ключевая проблема:** Необходимость разработки модели для количественной оценки влияния факторов с целью выявления причин авиационного происшествия.



# Цель и задачи работы

- **Цель:**

Разработка математической модели для вероятностного анализа причинно-следственных связей при расследовании авиационных происшествий

- **Задачи:**

1. Провести анализ методов решения задачи и выбрать аппарат моделирования
2. Сформировать и подготовить набор данных об авиационных происшествиях
3. Разработать структуру модели, обучить модель
4. Создать программное обеспечение
5. Проанализировать полученные результаты

# Существующие методы

Метод	Описание	Ограничение
<b>Традиционные методы</b>		
Описательный анализ	Детальное изучение каждого авиационного происшествия	Сложность обобщения, выявления системных проблем
Статистический анализ	Выявление тенденций, корреляций	Корреляция $\neq$ причинность, сложность учета ПСС
<b>Модели безопасности / Экспертные системы</b>		
Качественные модели (SHELL, HFACS)	Структурирование факторов	Трудность количественной оценки
Экспертные системы	Формализация знаний экспертов	Субъективность, трудоемкость разработки
<b>Современные подходы</b>		
Нейросети	Выявление скрытых закономерностей, построение предсказательных моделей	"Черный ящик", сложность интерпретации ПСС
<b>Вероятностные графические модели (Байесовские сети)</b>	Графическое представление зависимостей, вероятностный вывод	Требуют тщательной разработки структуры и оценки параметров

# Формирование данных

Источник данных: 146 отчетов об авиационных происшествиях гражданской авиации (2012-2023 гг.)

## 01 Переменные:

42 фактора влияния + 1 исход

## 03 Кодирование данных:

=0 – благоприятное условие

>0 – неблагоприятное

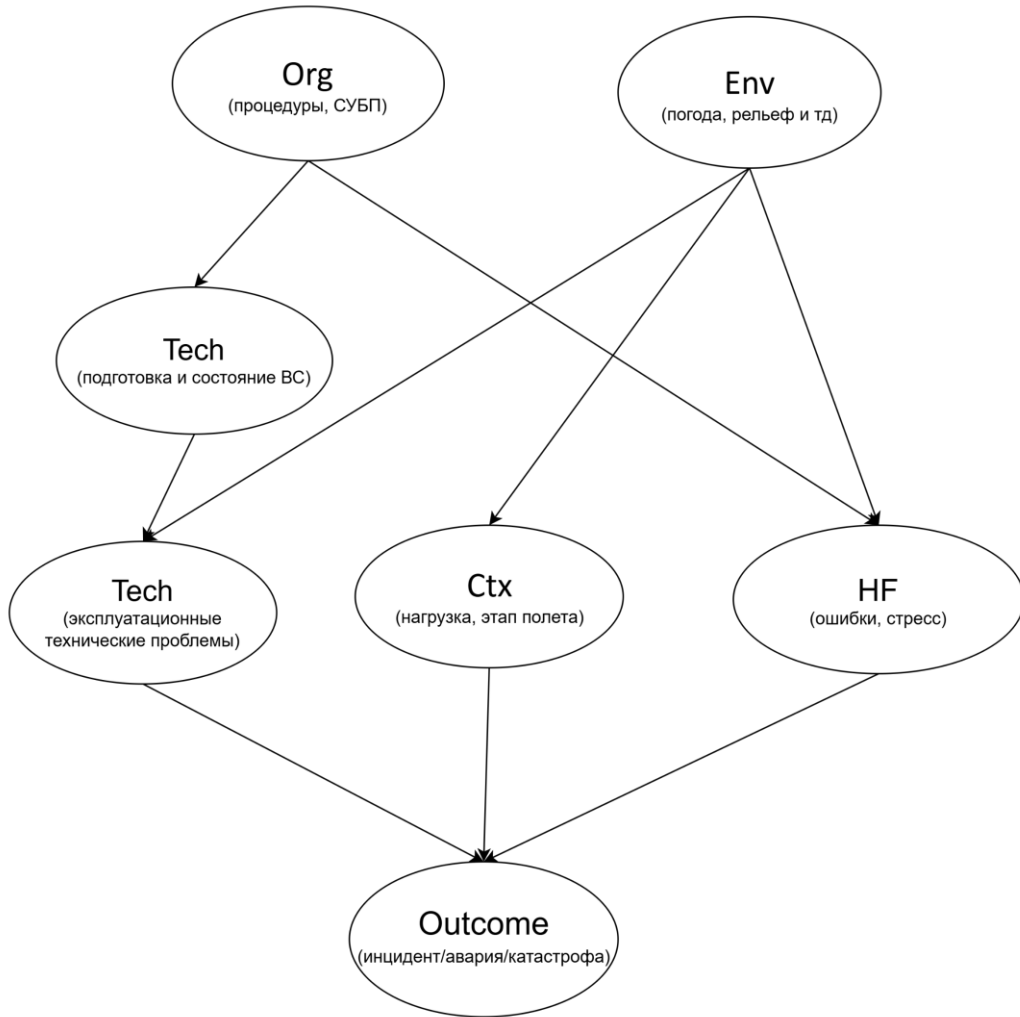
(Tech\_Fire = 1,

HF\_DecisionError = 0)

## 02 Классификация факторов:

- Человеческий: HF={HF\_SkillError, HF\_DecisionError,..., HF\_CRM}
- Технический: Tech={Tech\_SystemFailure, Tech\_DesignFlaw, Tech\_Fire}
- Средовой: Env={Env\_Icing, Env\_WindShear,..., Env\_Thunderstorm }
- Организационный: Org={ Org\_ProceduresQuality, Org\_Resources,..., Org\_Pressure}
- Контекстный: Ctx={Ctx\_Workload, Ctx\_UnexpectedEvents,... Ctx\_FlightPhase}

# Структура модели



**Структура** : ориентированный ациклический граф

- **Узлы**: переменные (42 фактора влияния и 1 исход).
- **Ребра**: 82 прямые причинно-следственные зависимости.

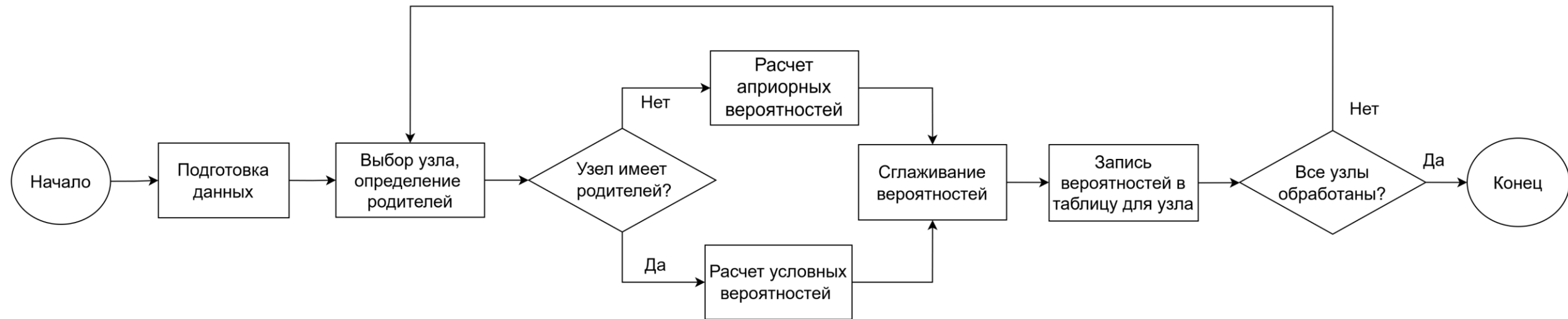
**Параметры** : таблицы условных вероятностей  $P(\text{узел} | \text{родители})$ .

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{parents}(X_i))$$

где:  $x_1, \dots, x_n$  – случайные величины факторов риска;

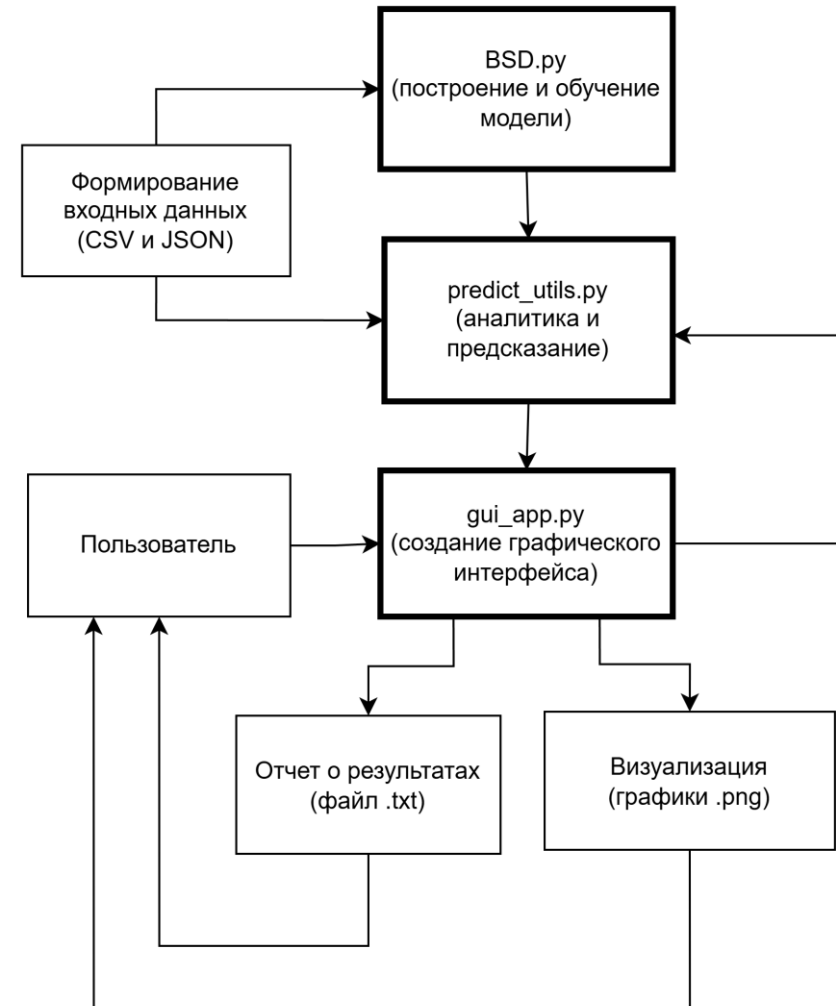
$\text{parents}(X_i)$  – множество родительских узлов для узла  $X_i$ .

# Алгоритм построения Байесовской сети доверия



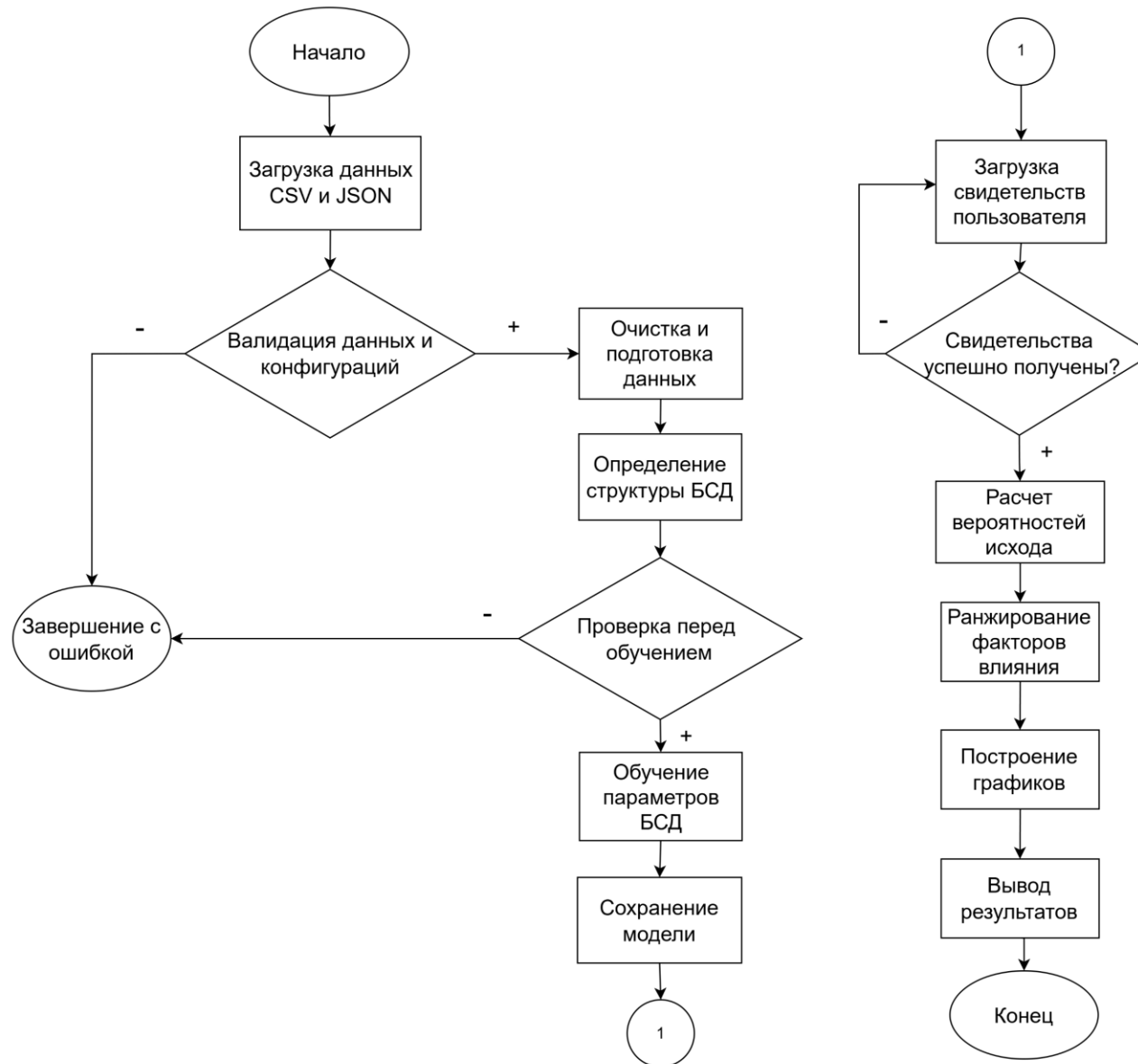
# Архитектура программного комплекса

- Язык программирования: Python
- Ключевая библиотека: pgmpy
- Модули BSD.py, predict\_utils.py, gui\_app.py





# Алгоритм работы программы



# Интерфейс

Система Анализа Рисков АП на Основе Байесовской Сети

## Анализ Рисков АП

Порядок работы:

1. Нажмите 'Ввести Свидетельства' для пошагового ввода известных факторов риска.
2. Нажмите 'Рассчитать Вероятности' для получения прогноза и анализа влияния факторов на основе введенных или загруженных свидетельств.
3. Для очистки используйте соответствующую кнопку.

Ввести Свидетельства (Опрос)

Рассчитать Вероятности

Очистить Все

Конфигурация: Загружена  
Модель: Загружена

## Результаты Анализа

Предсказание Исхода:

Ранжирование Факторов Влияния:

График Исхода

График Влияния Факторов

Сохранить Результаты (Текст)

Опрос по Факторам АП

Фактор 1 из 42

Ошибка навыков пилота

Возможные состояния:

☐ 0: Нет

☒ 1: Да

☐ Пропустить этот фактор (Нажмите Enter)

<< Назад

Далее >>

Окно опроса

# Результаты работы модели

## Предсказание Исхода:

Предсказанное распределение для узла 'Outcome\_Severity' (ID: Outcome\_Severity):

Outcome_Severity	phi(Outcome_Severity)
Инцидент	0.6703
Авария	0.1337
Катастрофа	0.1961

### Учитываемые свидетельства:

- Ошибка восприятия пилота: 1 (Да)
- Нарушение процедур пилотом (общее): 1 (Да)
- Сдвиг ветра: 1 (Присутствует (значимый))
- Видимость: 1 (Ниже минимума)
- Высота нижней границы облаков (ВНГО): 1 (Ниже минимума)
- Ветер у земли: 1 (За пределами ограничений)
- Этап полета: 6 (Заход на посадку)

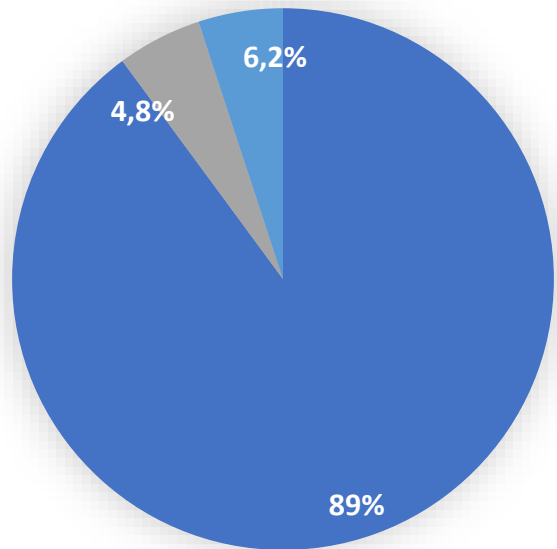
## Ранжирование Факторов Влияния:

Фактор (Проблемное состояние)	P (Небл.   Факт.)	Коефф. влияния
Отказ системы ВС (общий) (Отказ)	0.7437	2.26
Риск препятствий (аэродром/вблизи) (Высокий)	0.7436	2.26
Пожар на борту (Да)	0.7364	2.23
Конструктивный недостаток ВС (Присутствует (влияющий))	0.5269	1.60
Обледенение (Умеренное)	0.4328	1.31
Ошибка заправки топливом (Да)	0.4255	1.29
Риск FOD (Посторонние предметы) (Высокий)	0.4245	1.29
Риск столкновения с птицами (Средний)	0.4243	1.29
Риск столкновения с птицами (Высокий)	0.4243	1.29
Обледенение (Сильное)	0.3992	1.21
Навигационные средства аэродрома (Неисправны/Отсутствуют)	0.3932	1.19

[График Исхода](#)[График Влияния Факторов](#)[Сохранить Результаты \(Текст\)](#)

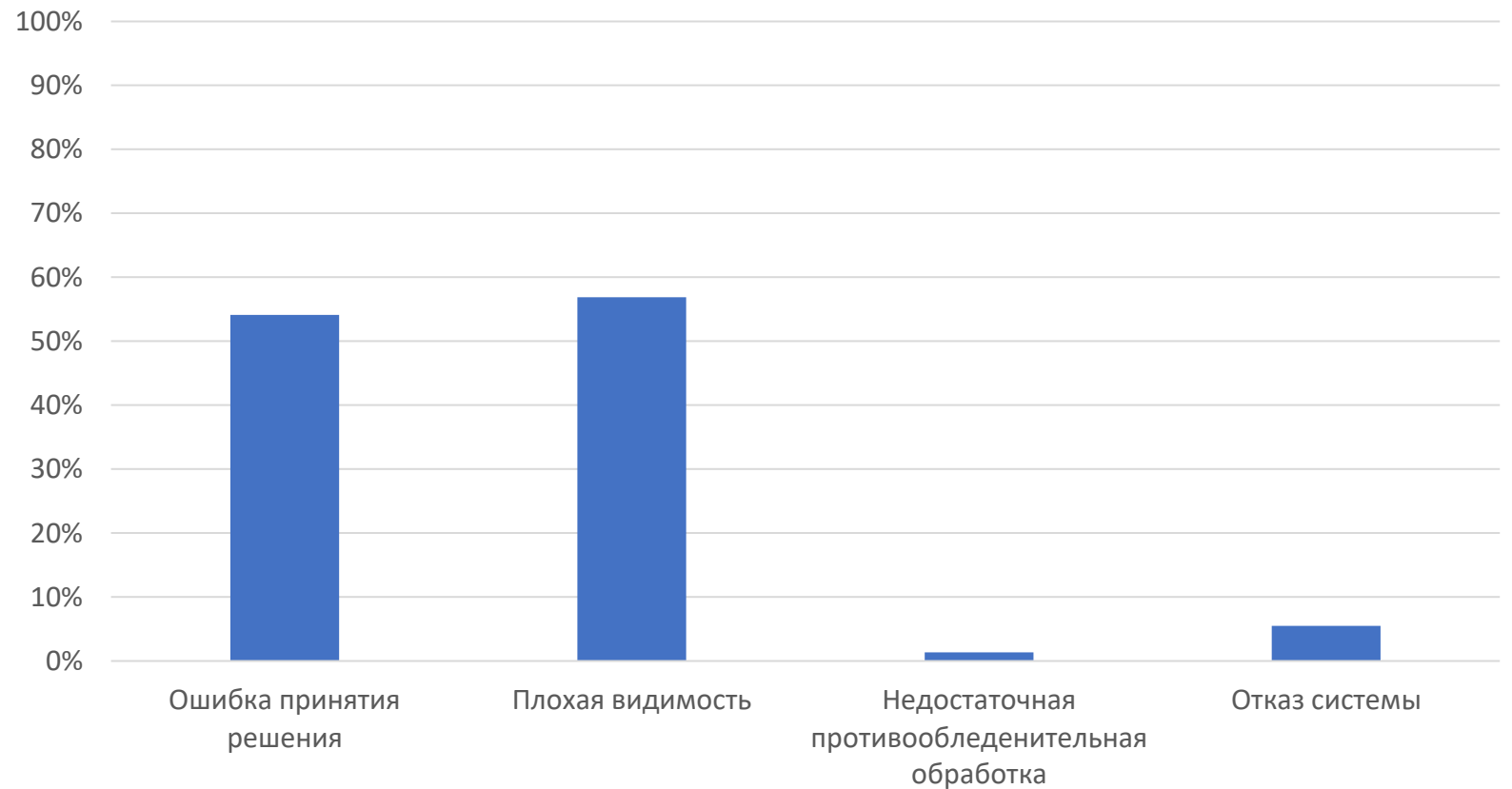
# Анализ результатов: априорные вероятности

Априорное распределение  
исхода АП

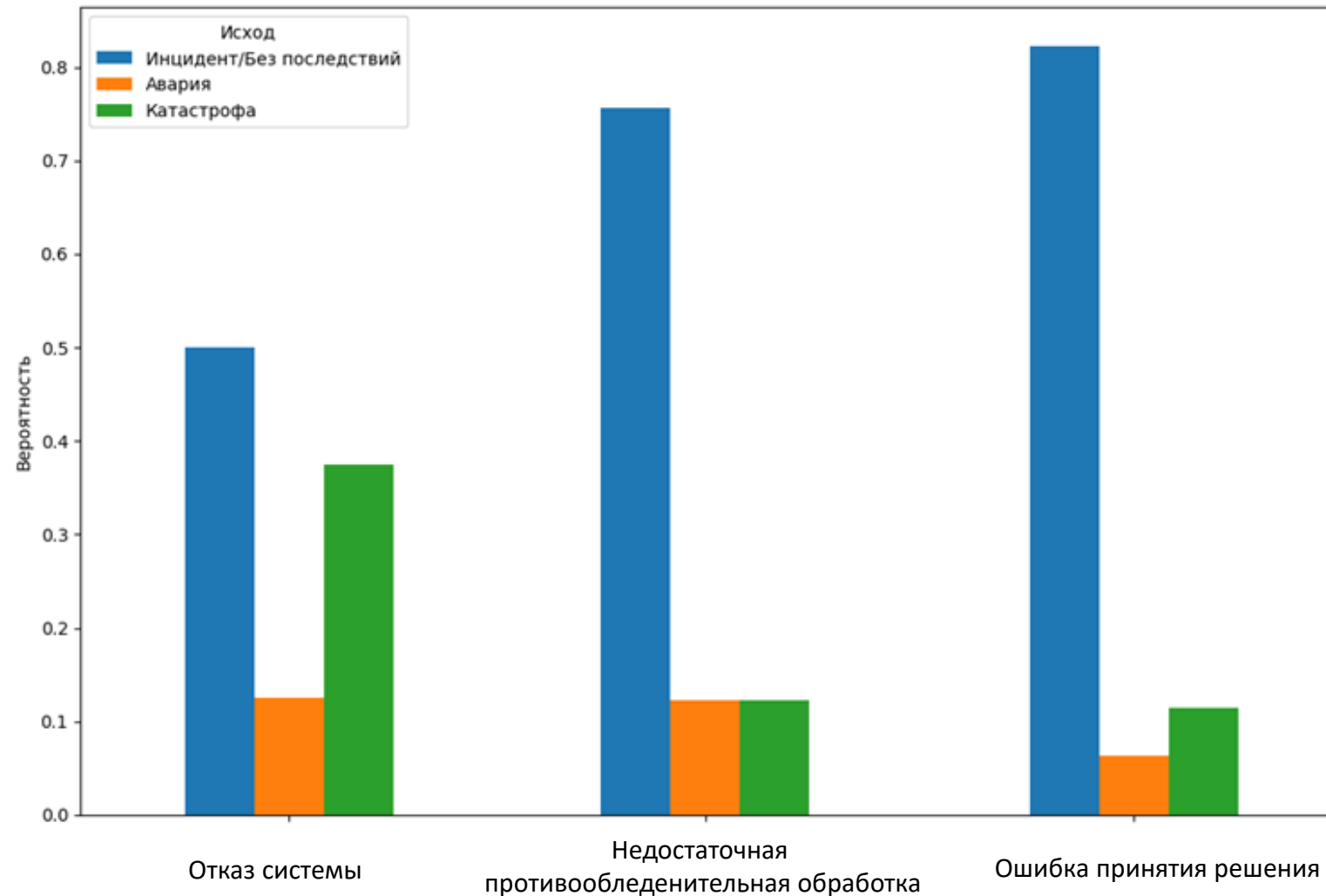


■ Инцидент ■ Авария ■ Катастрофа

Априорное количество «проблемных» состояний факторов

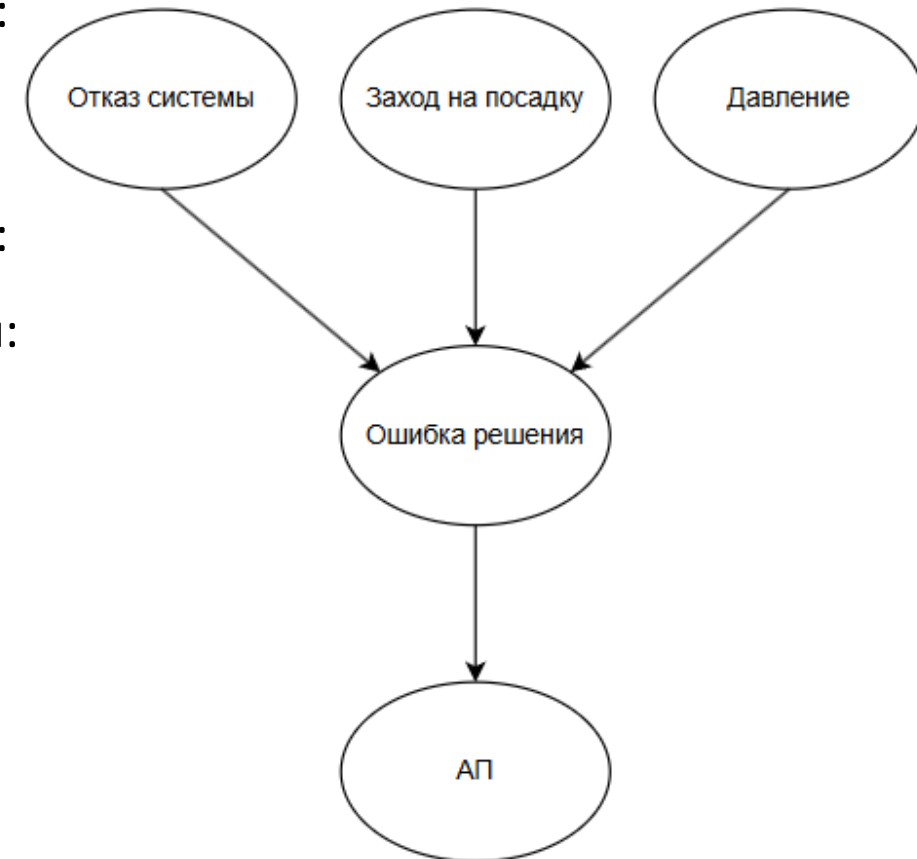


# Анализ результатов: апостериорные вероятности



# Анализ результатов: логический вывод и влияние факторов

- **Входные условия для сценария 1:** отказ системы: да, этап полета: заход на посадку, давление на экипаж: высокое.
- **Входные условия для сценария 2:** отказ системы: да, этап полета: заход на посадку, давление на экипаж: высокое, ошибка решения: да.
- **Ключевые результаты:**
  - $P(\text{Катастрофа/авария}) = 0,11$  – априорная
  - $P(\text{Катастрофа/авария} \mid \text{Сценарий1}) = 0,65$  – апостериорная 1
  - $P(\text{Катастрофа/авария} \mid \text{Сценарий2}) = 0,73$  – апостериорная 2



# Заключение

Разработана математическая модель для вероятностного анализа причинно-следственных связей при расследовании авиационных происшествий

1. Проведен анализ методов моделирования, позволивший обосновать выбор БСД
2. Сформирован и подготовлен набор данных об авиационных происшествиях
3. Разработана структура модели, проведено обучение модели
4. Создано программное обеспечение, включая пользовательский интерфейс АРМ
5. Проанализированы полученные результаты

Спасибо за внимание!

Домникова Екатерина  
domnikova2003@list.ru



# Интерфейс

## Анализ Рисков АП

*Байесовская Сеть Доверия*

Это приложение использует обученную Байесовскую сеть для анализа причинно-следственных связей в авиационных происшествиях.

Порядок работы:

1. Нажмите 'Ввести Свидетельства' для пошагового ввода известных факторов риска.
2. Нажмите 'Расчитать Вероятности' для получения прогноза и анализа влияния факторов на основе введенных или загруженных свидетельств.
3. Для очистки используйте соответствующую кнопку.

Ввести Свидетельства (Опрос)

Расчитать Вероятности

Очистить Все

Конфигурация: Загружена

Модель: Загружена

## Результаты Анализа

Предсказание Исхода:

```
--- Текущие Задачные Свидетельства ---
- Отказ системы ВС (общий): 1 (Отказ)
- Производственное давление: 1 (Высокое)
- Этап полета: 6 (Заход на посадку)
```

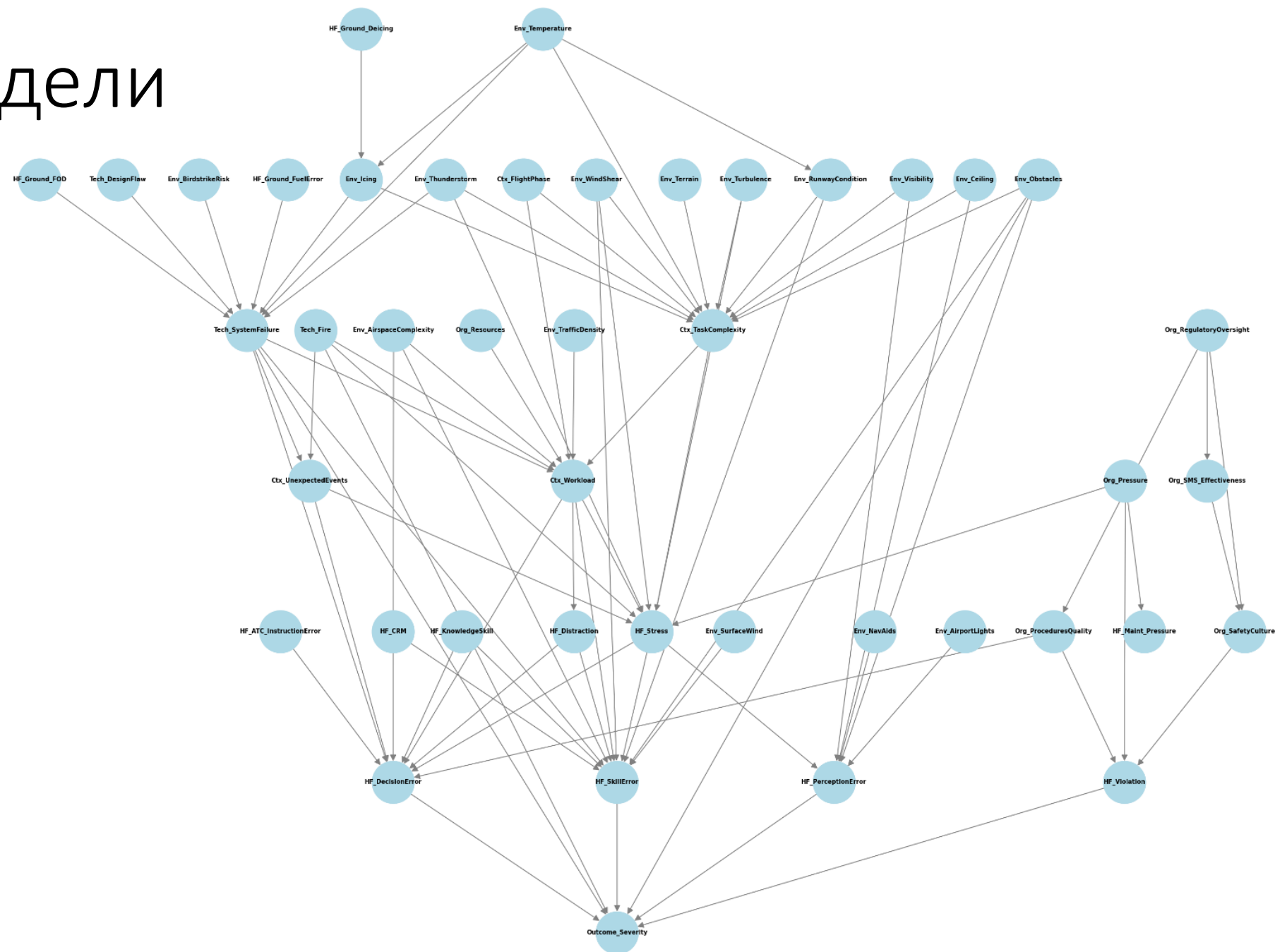
Ранжирование Факторов Влияния:

График Исхода

График Влияния Факторов

Сохранить Результаты (Текст)

# Граф модели



# Таблица данных для обучения

Incident_ID	HF_SkillError	HF_DecisionError	HF_PerceptionError	HF_Violation	HF_Stress	HF_Distract	HF_KnowledgeSkill	HF_CRM	HF_ATC_InstructionError	HF_MaintenancePressure
1_A319_01.01.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2_A319_02.01.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3_A-319_09.01.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
4_A-320_10.01.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
5_A-320_14.01.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6_A-320_01.02.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
7_AH-24_03.02.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
8_AH-24_03.02.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
9_A320_28.02.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
11_ATR-72_02.04.12	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0
15_B-747_29.04.12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18_Ty-134_14.05.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
20_Ah-26-100_21.05.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
22_A-320_25.05.12	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0

# Расчет условной и априорной вероятностей

## 1. Априорная вероятность

$$P(X_i = x_i) = \frac{N(X_i=x_i)}{N_{total}}$$

Где:

$N(X_i = x_i)$  – кол-во случаев, когда  $X_i$  принимает значение  $x_i$

$N_{total}$  – общее кол-во случаев в выборке

## 2. Условная вероятность

$$P(X_i = x_i | Parents(X_i) = pa_k) = \frac{N(X_i=x_i, Parents(X_i)=pa_k)}{N(Parents(X_i)=pa_k)}$$

Где:

$N(X_i = x_i, Parents(X_i) = pa_k)$  – кол-во случаев, когда  $X_i = x_i$  одновременно с  $Parents(X_i) = pa_k$

$N(Parents(X_i) = pa_k)$  – общее кол-во случаев, когда родители  $Parents(X_i)$  находились в комбинации состояний  $pa_k$

# Расчет вероятности сценария авиационного происшествия с помощью Байесовской сети

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{parents}(X_i))$$

1. Определение полного сценария:  $X_1 = 1, X_2 = 0, X_3 = 0 \dots$
2. Для каждого узла  $X_i$  и его заданного состояния  $x_i$  в сценарии
  - а. Определение состояний его родительских узлов  $\text{parents}(X_i)$
  - б. Поиск нужной условной вероятности в СРТ узла  $P(x_i | \text{parents}(X_i))$
3. Накопление произведения:  $\prod_{i=1}^n P(x_i | \text{parents}(X_i))$

# Таблицы условных вероятностей

Параметры модели– таблицы, количественно описывающие силу влияния «родительских» факторов на «дочерний» узел.

Узел: Ошибка принятия решений

(Отказ системы)	(Рабочая нагрузка)	P(Ошибка принятия решений = 1   Родители)
0 (Нет отказа)	0 (Нормальная)	0.05
0 (Нет отказа)	1 (Высокая)	0.20
1 (Отказ есть)	0 (Нормальная)	0.30
1 (Отказ есть)	1 (Высокая)	<b>0.65</b>

