

**Разработка прогностической модели срыва плазменного разряда  
токамака “Глобус-М2” для обеспечения целостности внутренней  
конструкции**

Выполнил:

Ануфриев Е.А.

Руководитель:  
Р.Ю.

к.т.н. Семендяев

## Актуальность

Плазменный срыв – опасное явление для будущих токамаков и термоядерных реакторов, заключающееся в перезамыкании магнитных силовых линий на материальные поверхности и дальнейшем выбросе горячей плазмы, способное нарушить конструкционную целостность установок.

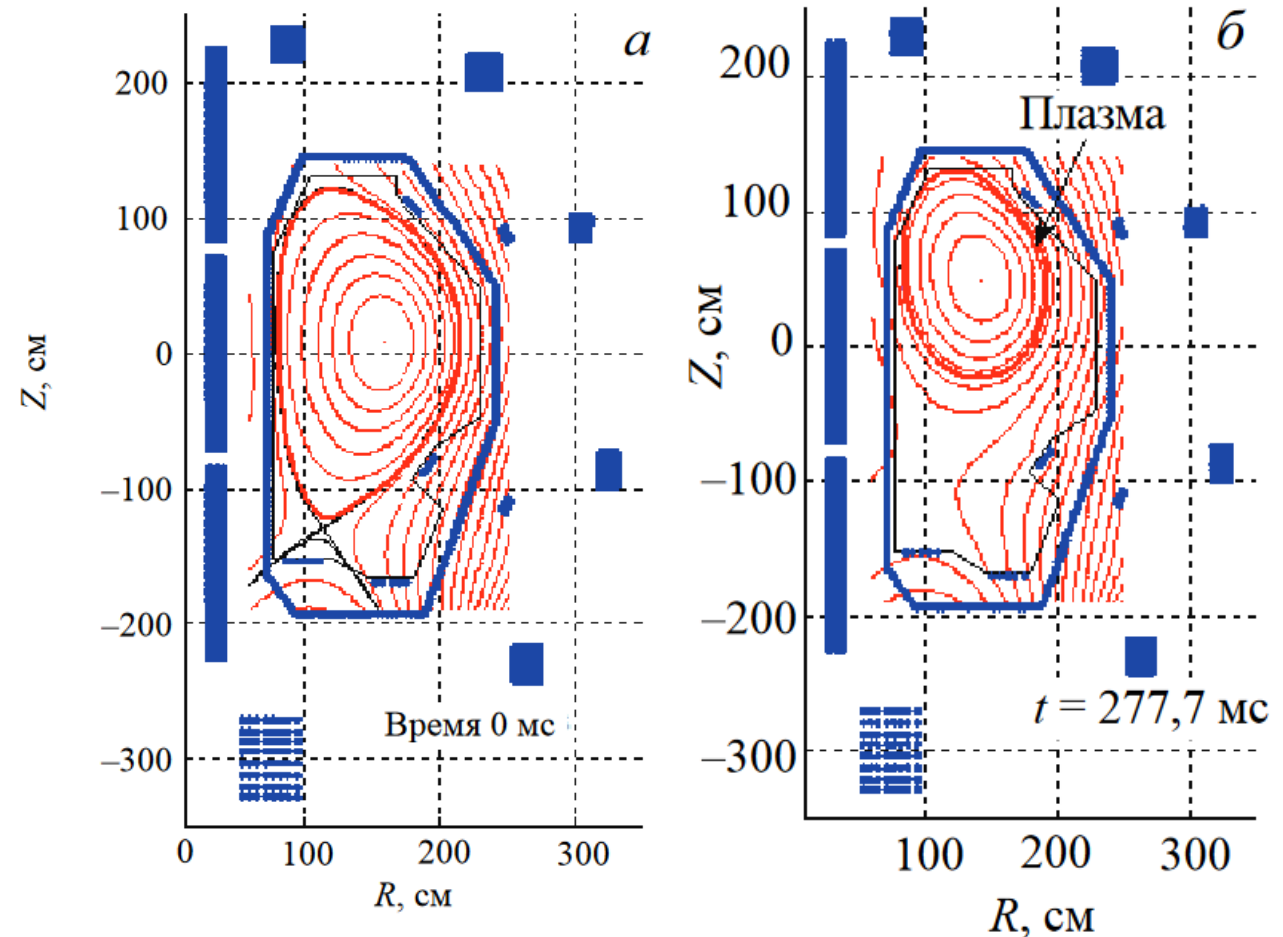


Рис.1 Эволюция магнитной конфигурации токамака T-15: а) плато тока; б) начало срыва

## Цель и задачи

### Цель работы:

Разработать прогностическую модель определения момента срыва плазменного разряда токамака “Глобус-М2” для возможности обеспечения целостности внутренней конструкции установки.

### Задачи:

- Предобработка сигналов диагностик токамака: приведение данных к общей временной шкале, выделение списка диагностик, единых для всех разрядов;
- Выбор основных сигналов диагностик;
- Построение прогностической модели предсказания момента срыва разряда;
- Оценка предсказательной способности модели.

## Формат экспериментальных данных

Имеется 300 файлов (один на разряд), содержащих до 90 временных рядов сигналов различных диагностик, количество которых варьируется от разряда к разряду. Интервал и границы измерений также различны для некоторых диагностик.

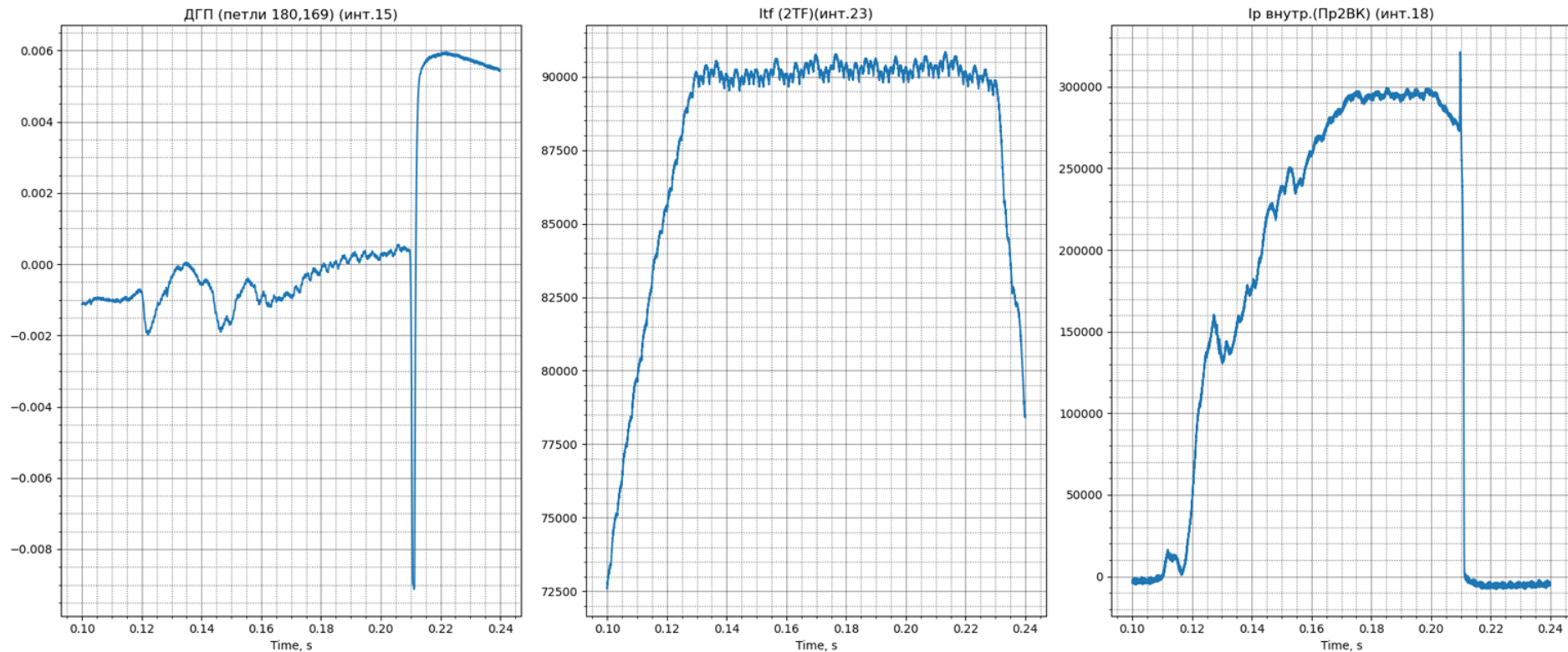
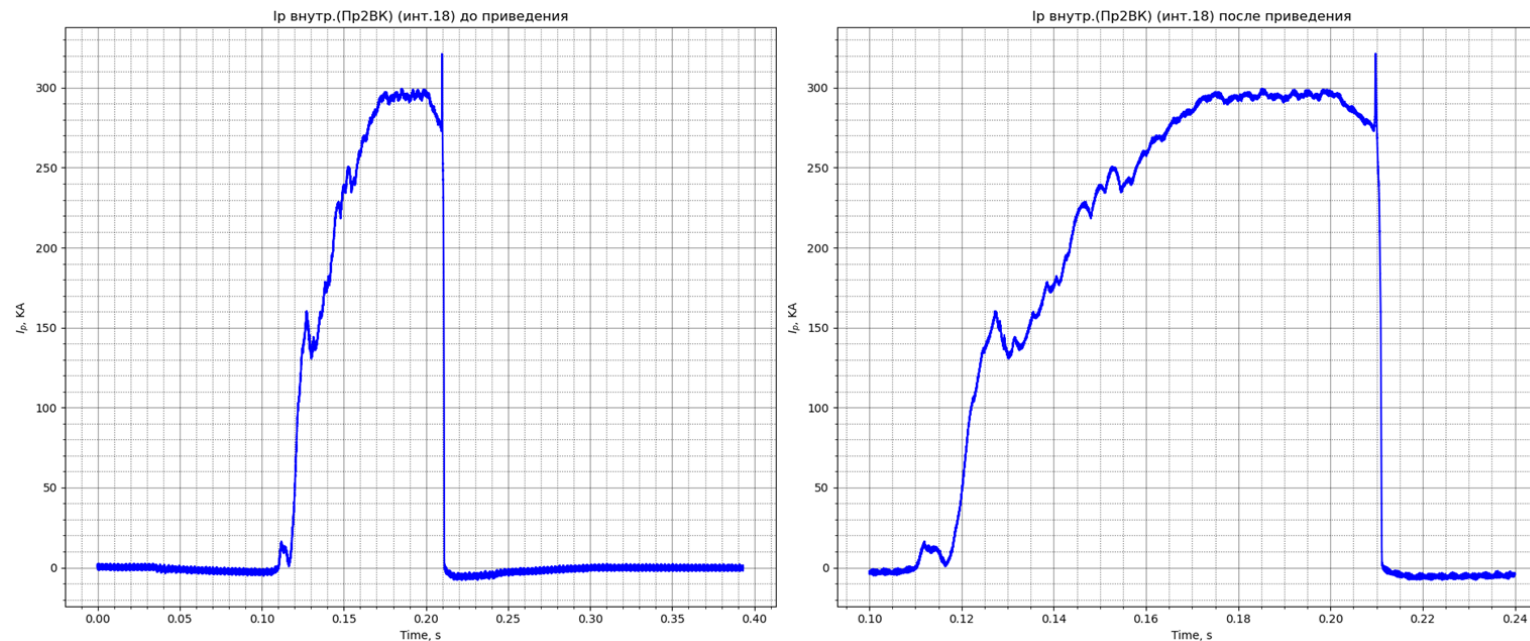


Рис.2 Примеры записанных в файл сигналов.

## Предобработка данных

- Выделение общих для всех разрядов сигналов диагностик сокращает количество рассматриваемых соответствующих временных рядов с 60-90 до 39.
- Вырезание данных из диагностик, относящихся непосредственно к формированию полезных сигналов, что соответствует интервалу 100 мс – 260 мс.
- Создание единой временной шкалы с помощью интерполяции приводит к 160 000 значениям на сигнал (по наибольшему количеству точек среди сигналов).



*Рис.3 Вырезание на примере профиля плазменного тока (график слева) полезной части интерполированного сигнала (график справа).*

## Введение целевой переменной

Бинарная переменная срыва принимает значение “1” за 5 мс до пика плазменного тока перед его резким падением.

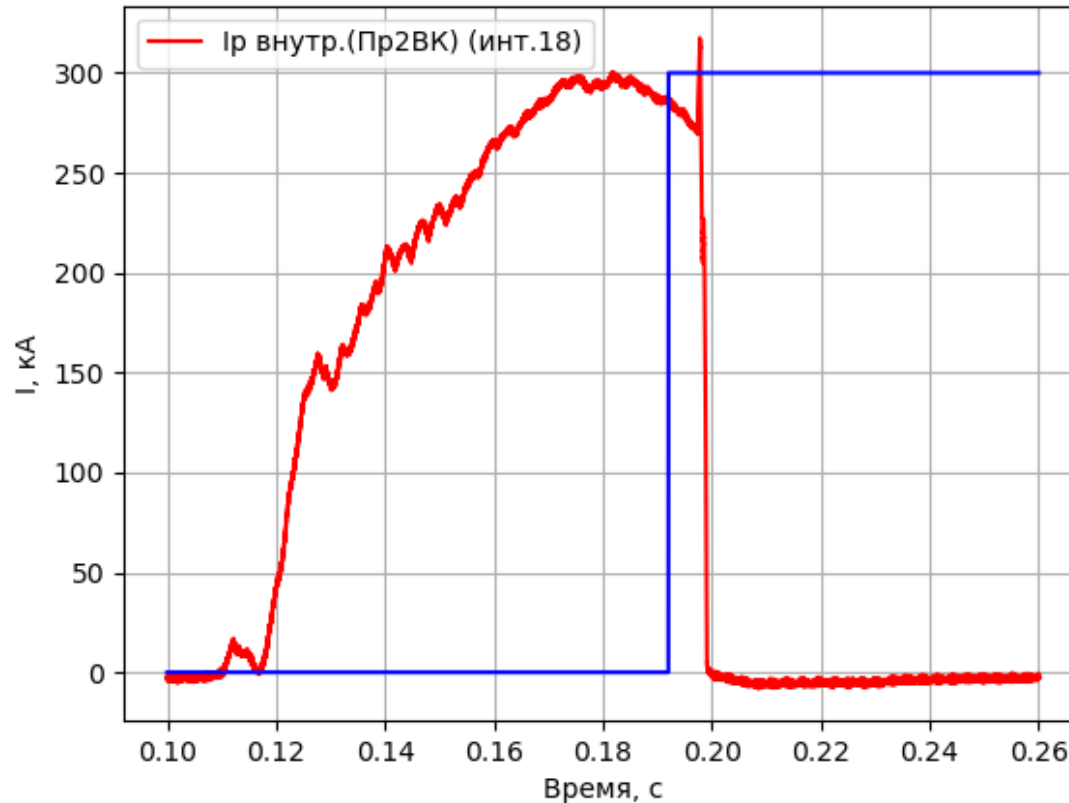


Рис.4 Профиль введенной целевой переменной(синяя кривая) на фоне профиля плазменного тока (красная кривая).

## Выбор основных сигналов

Выбор опорных сигналов среди оставшихся 39 осуществляется с помощью ансамблевого метода случайный лес. Суммарный вклад  $\approx 80\%$

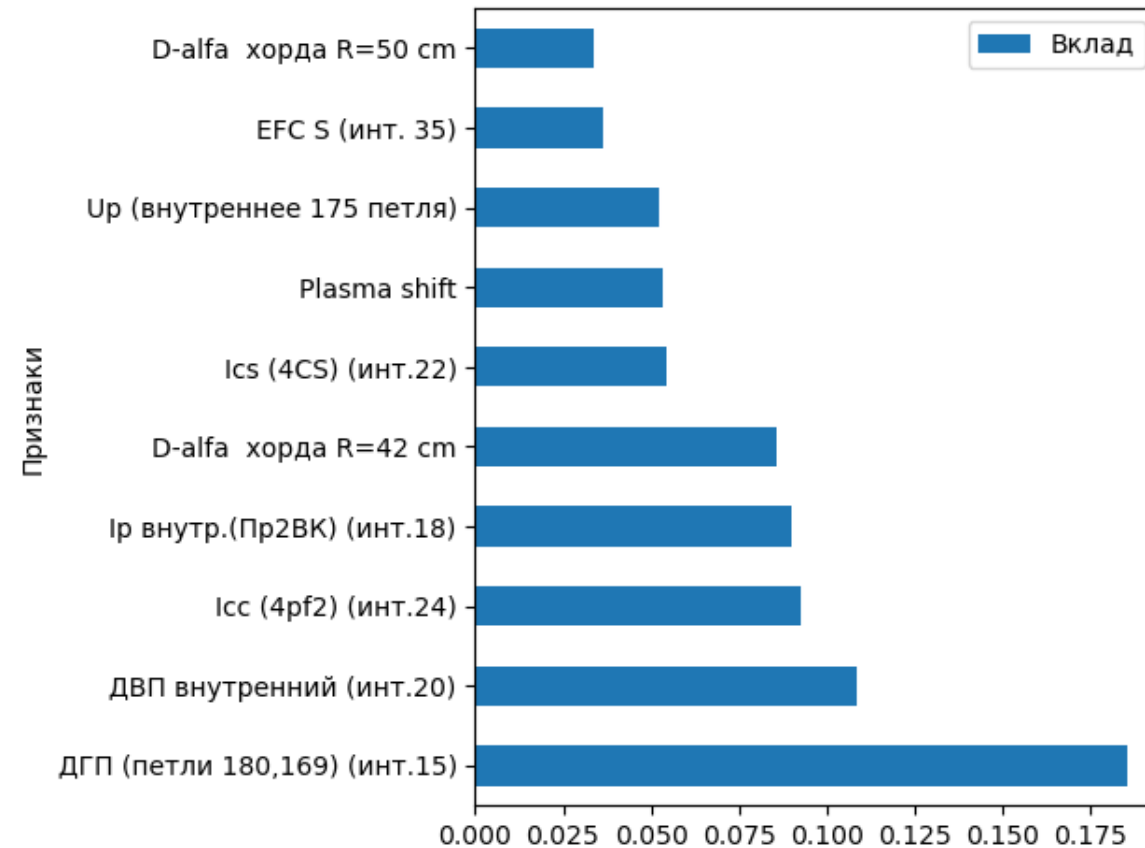


Рис.5 Вклад диагностических сигналов в целевую переменную на основе случайного леса.

# Подготовка данных для нейросетей



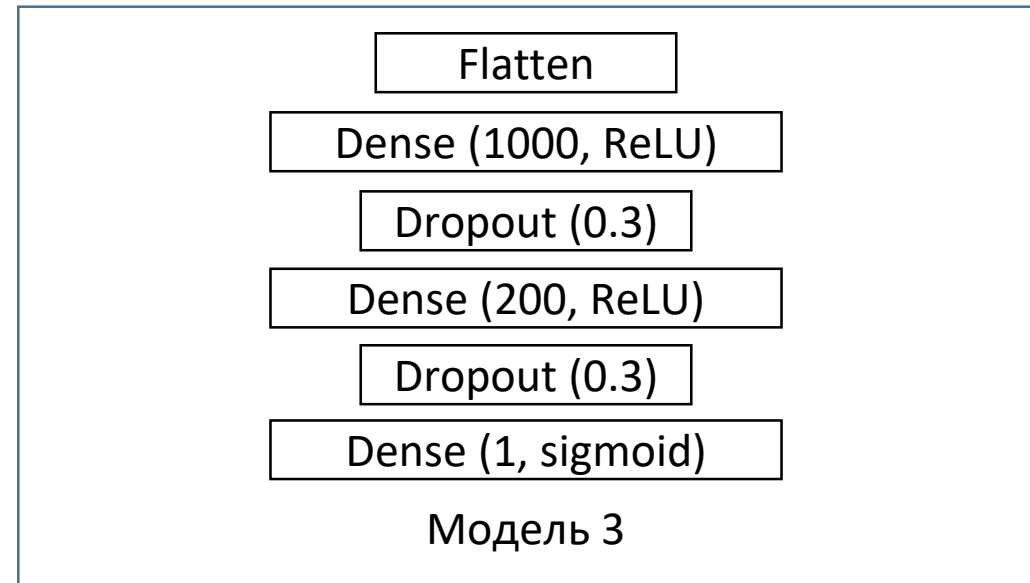
# Многослойный перцептрон

В качестве первой простейшей модели глубокого обучения был выбран многослойный перцептрон. При построении разных моделей варьировалось количество слоев и количество нейронов в них.

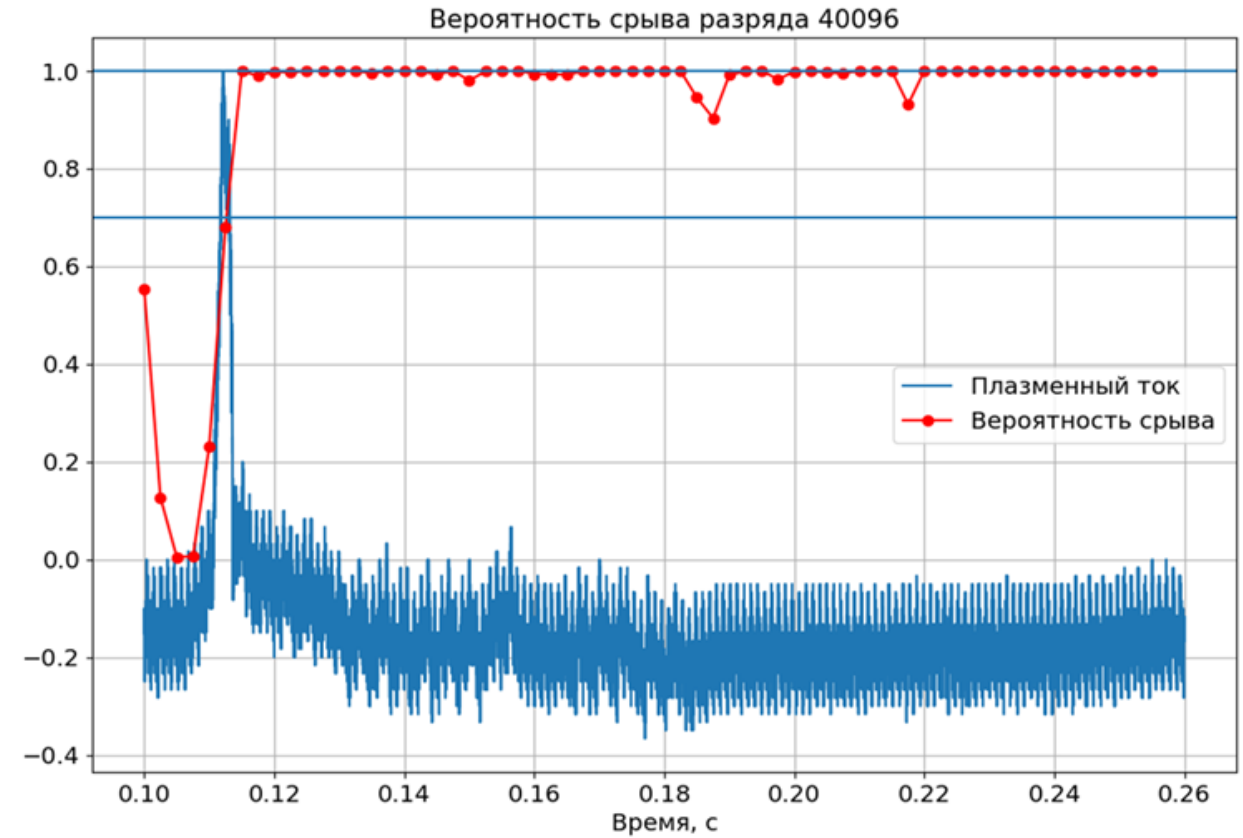
Неизменные характеристики модели: оптимизатор Adam, темп обучения  $1E-3$ , функция потерь бинарная кроссэнтропия, функция активации скрытых слоев ReLU и выходного Sigmoid.

Номер модели	Precision	Recall	F1
1	0.98	0.90	0.94
2	0.97	0.86	0.91
<b>3</b>	<b>0.99</b>	<b>0.89</b>	<b>0.94</b>
4	0.99	0.88	0.93

Время прямого распространения составляет 8 мс, а занимаемый на физическом носителе объем - 500 мб



# Предсказание срыва многослойным перцептроном



*Рис.6 Вероятность срыва для разряда #42573 (график слева) и #40096 (график справа) для модели многослойного перцептрона*

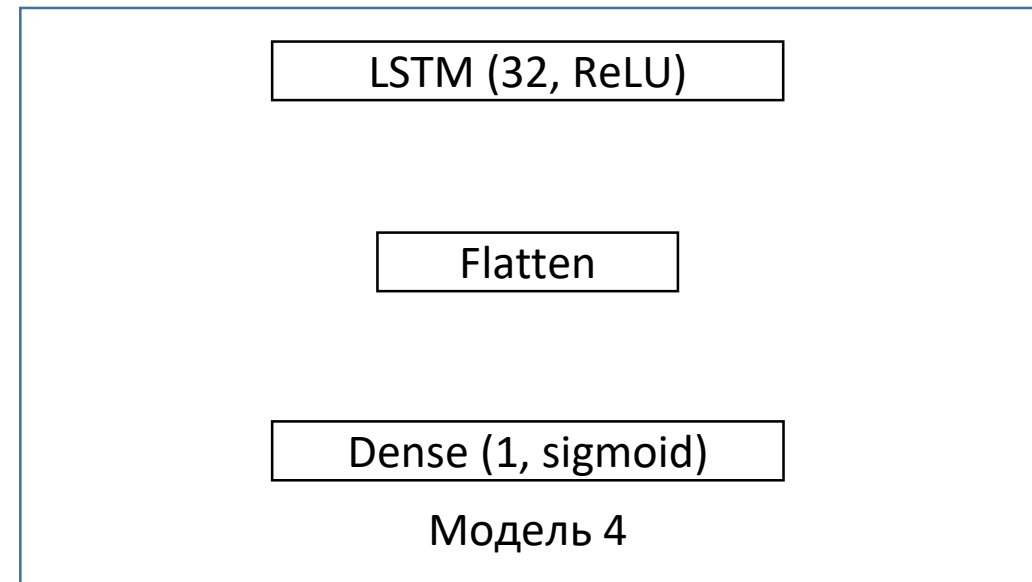
# LSTM

В качестве несколько более сложной модели предсказание срыва проведено с использованием LSTM слоев.

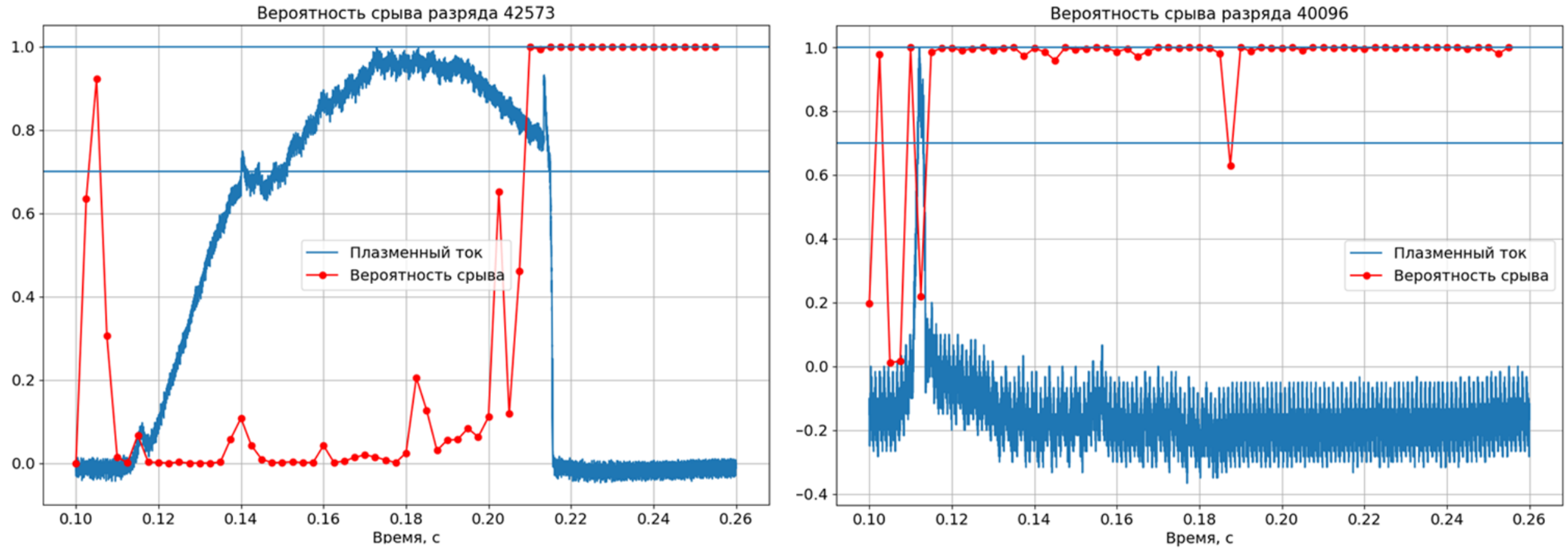
Неизменные характеристики модели: оптимизатор Adam, темп обучения 1E-3, функция потерь бинарная кроссэнтропия, функция активации скрытых слоев ReLU и выходного Sigmoid.

Номер модели	Precision	Recall	F1
1	0.98	0.88	0.92
2	0.98	0.89	0.93
3	0.98	0.90	0.94
<b>4</b>	<b>0.97</b>	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>
5	0.97	0.92	0.94

Время прямого распространения составляет 300 мс, а занимаемый на физическом носителе объем - 10 мб



# Предсказание срыва LSTM сетью



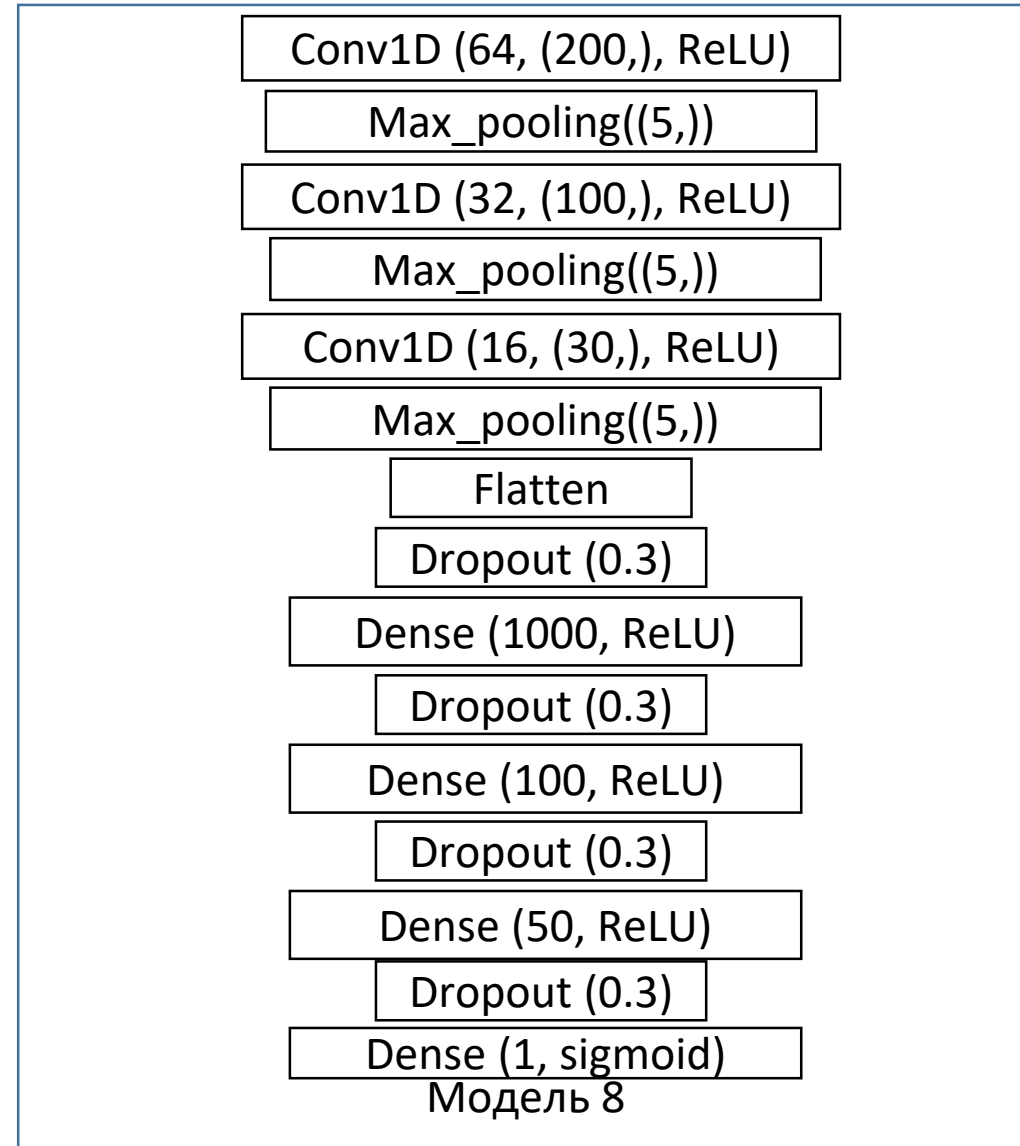
*Рис.7 Вероятность срыва для разряда #42573 (график слева) и #40096 (график справа) для модели на основе слоев долгой краткосрочной памяти*

# CNN

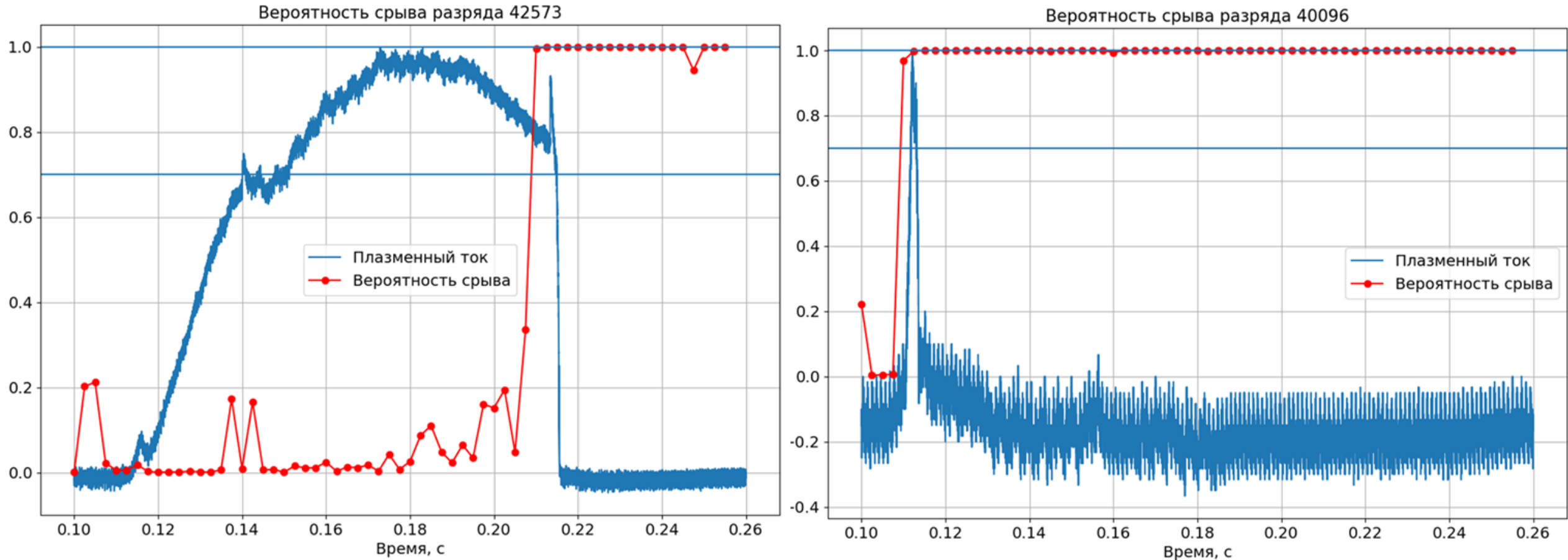
Последняя примененная модель глубокого обучения – сверточная нейросеть.

Номер модели	Precision	Recall	F1
1	0.97	0.91	0.94
2	0.97	0.91	0.94
3	0.98	0.91	0.95
4	0.98	0.89	0.93
5	0.98	0.91	0.94
6	0.99	0.88	0.93
7	0.99	0.87	0.93
<b>8</b>	<b>0.99</b>	<b>0.92</b>	<b>0.95</b>
9	0.99	0.90	0.94

Неизменные характеристики: оптимизатор Adam, темп обучения  $1E-3$ , функция потерь бинарная кроссэнтропия, функция активации скрытых слоев ReLU и выходного Sigmoid. Время прямого распространения составляет 130 мс, а занимаемый на физическом носителе объем - 15 мб



# Предсказание срыва CNN



*Рис.8 Вероятность срыва для разряда #42573 (график слева) и #40096 (график справа) для модели сверточной нейросети*

## Результаты сравнения моделей

- Метрики Precision, Recall и F1 трех лучших моделей имеют схожие значения
- Только модель на основе многослойной сверточной нейросети не предсказывает ложное срабатывание в начале разряда.
- Все три класса моделей обладают своими недостатками: многослойный перцептрон занимает на порядок больше пространства на носителе, чем модели на основе сверточных слоев или долгой краткосрочной памяти, но и время прямого распространения также на порядок меньше

Модель	Precision	Recall	F1
Сверточная нейросеть	0.99	0.92	0.95
Долгая краткосрочная память	0.97	0.92	0.95
Многослойный перцептрон	0.99	0.89	0.94

Модель	Время, мс	Объем, мб
Сверточная нейросеть	130	15
Долгая краткосрочная память	300	10
Многослойный перцептрон	8	500

## Выводы

- Построены прогностические модели предсказания момента срыва разряда на основе ARIMA, многослойного перцептрона, LSTM и CNN сетей;
- Проведена предобработка сигналов диагностик токамака: данные приведены к единой временной шкале, выделен список единых для всех разрядов диагностик;
- Наибольшей предсказательной силой обладает модель сверточной сети.