

The 8th International Conference on Deep Learning in Computational Physics

*June 19-21, 2024*

*SINP MSU, Moscow, Russia*

# **Прогнозирование состояния магнитосферы Земли с помощью специального алгоритма для работы с многомерными временными рядами**

**Владимиров Роман Дмитриевич**

**Широкий Владимир Романович**

**Баринов Олег Георгиевич**

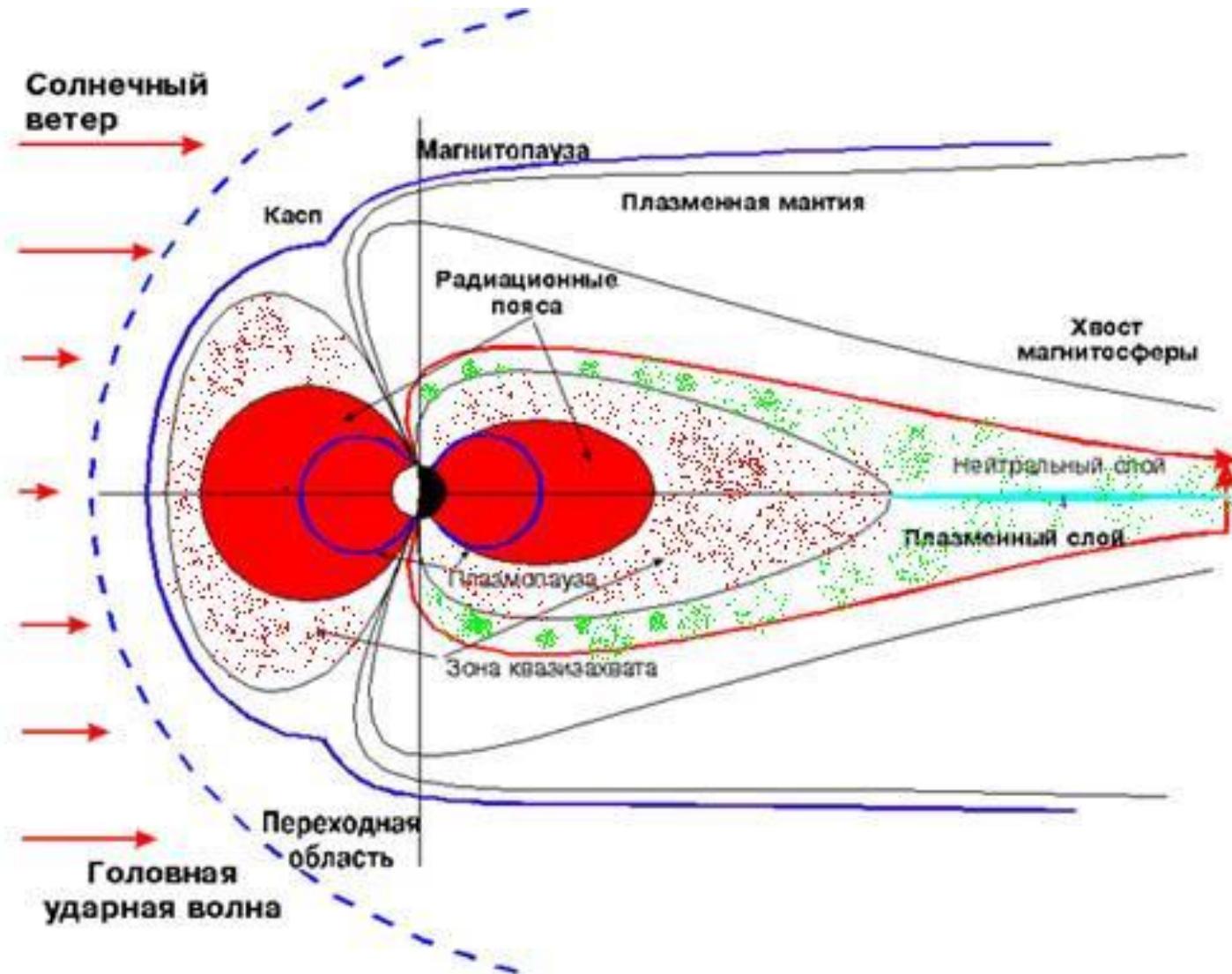
**Доленко Сергей Анатольевич**

**Мягкова Ирина Николаевна**

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ*

# Введение

- **Магнитосферой Земли** называют окружающее ее космическое пространство, на состояние которого влияет магнитное поле Земли.
- Со стороны Солнца на магнитосферу воздействует **солнечный ветер** – поток ионизированных частиц, истекающий из солнечной короны в окружающее космическое пространство со скоростью 270—1200 км/с.



# Постановка задачи и актуальность работы

- В результате взаимодействия солнечного ветра (СВ) с магнитосферой Земли могут возникать возмущения магнитосферы Земли – геомагнитные возмущения
- Прогнозирование так называемой «космической погоды» является важной и актуальной задачей, которая в данном случае решается методами машинного обучения
- В настоящей работе выполняется снижение размерности входного пространства и оценка важности входных признаков с использованием различных алгоритмов машинного обучения

# Цель исследования

- Целью настоящей работы является адаптация и применение 4-ступенчатого алгоритма анализа многомерных временных рядов с целью прогнозирования наступления тех или иных событий и поиска их предвестников – явлений, представляющих собой некую неизвестную комбинацию значений параметров, описывающих объект.
- Применение разработанного алгоритма к различным данным, описывающим состояние магнитосферы Земли

# Количественное описание состояния магнитосферы Земли

- Для оценки степени возмущенности магнитосферы Земли используются различные подходы и различные характеристики
- В данной работе разработанный алгоритм применялся к среднечасовым данным для прогнозирования:
  - **К<sub>p</sub>-индекса**
  - **D<sub>st</sub>-индекса**
  - **Потоков релятивистских электронов с энергиями выше 2 МэВ**

# Общая схема работы алгоритма

1. Отбор наиболее существенных физических признаков (переменных) из числа тех, от которых, по мнению исследователя, может зависеть прогнозируемая искомая величина.
2. Определение диапазона используемых задержек.
3. Отбор наиболее важных входных признаков из полученного многомерного пространства, ограниченного на первых двух этапах.
4. Подбор гиперпараметров модели.

# Входные данные

- Параметры солнечного ветра (СВ) в точке Лагранжа L1 между землей и Солнцем:
  - Скорость СВ (км/с)
  - Температура СВ (К)
  - Плотность протонов в СВ ( $\text{см}^{-3}$ )
- Параметры вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в системе GSM:
  - Компоненты  $V_x, V_y, V_z$
  - Модуль ММП  $V_{magn}$
- Геомагнитный индекс Dst
- Планетарный индекс Kp
- Потоки электронов с энергиями  $> 2\text{МэВ}$
- Случайные шумовые признаки, добавленные для проверки того, что система распознает их как несущественные для прогнозирования целевой переменной.

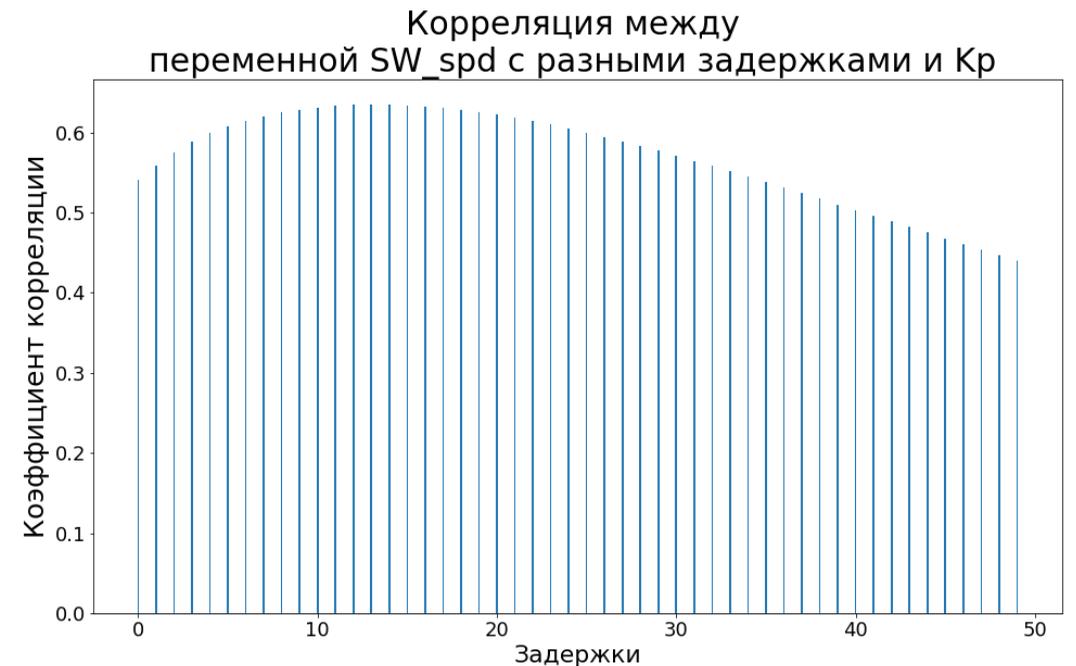
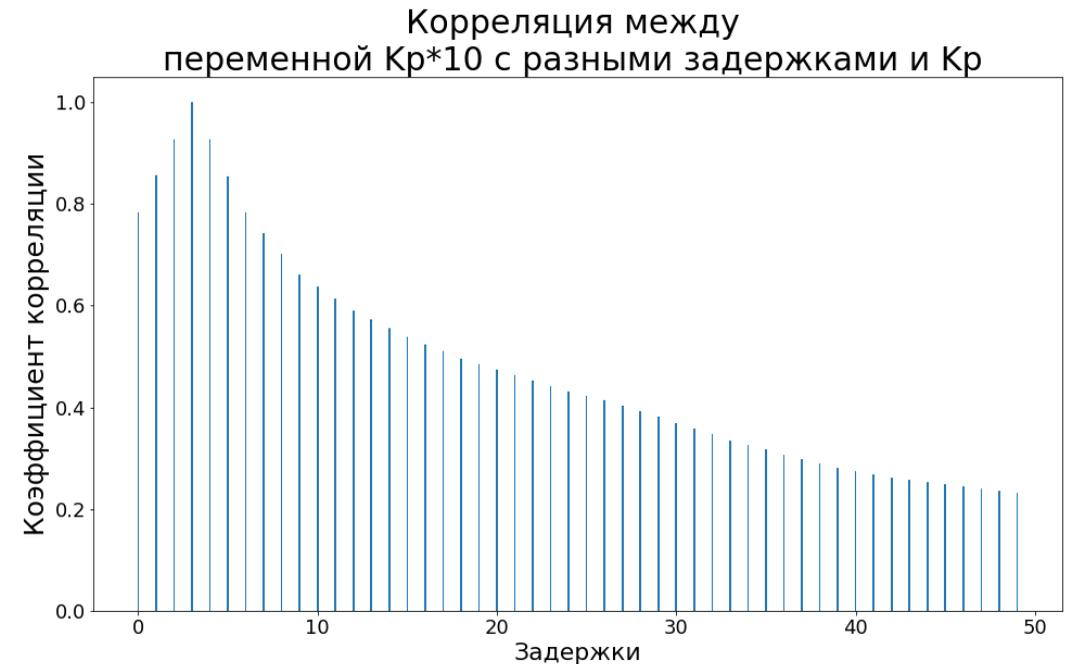
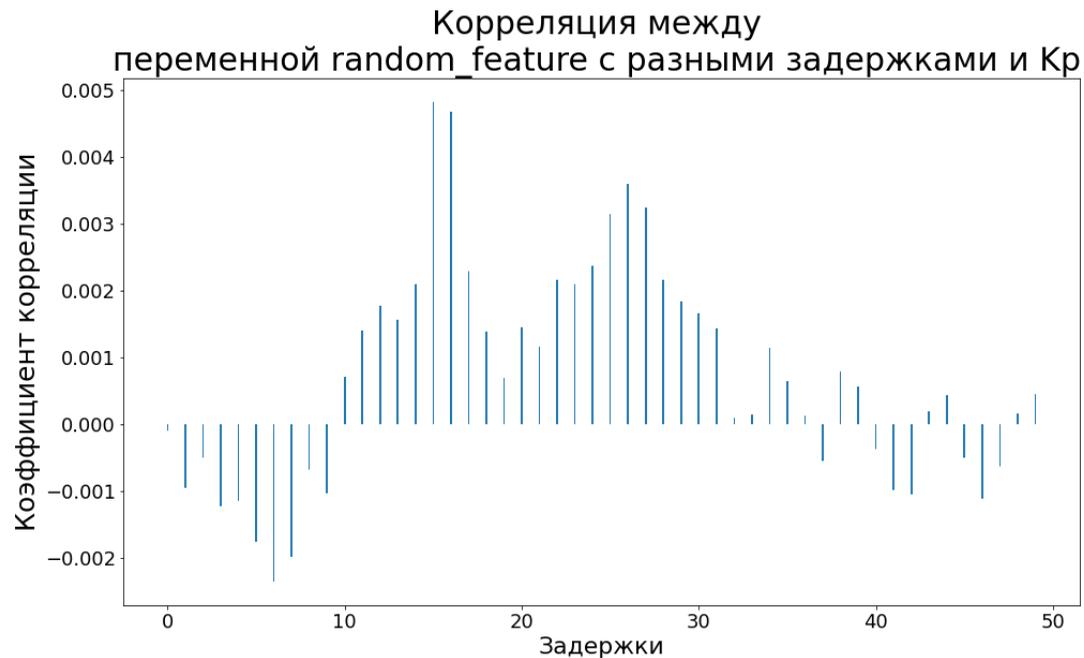
# Многомерный временной ряд

- Используются данные с октября 1997 по июль 2023
- Дополнительно вводятся 4 дополнительных временных параметра для учета фазы суток и фазы года
- Тренировочный набор 1997 – 2015
- Валидационный набор составляет 20% от тренировочного, выбирается случайным образом
- Тестовый набор 2016 – 2023
- Горизонт прогнозирования 3 часа

# Результаты отбора на первом этапе для Кр

В наборе остались:

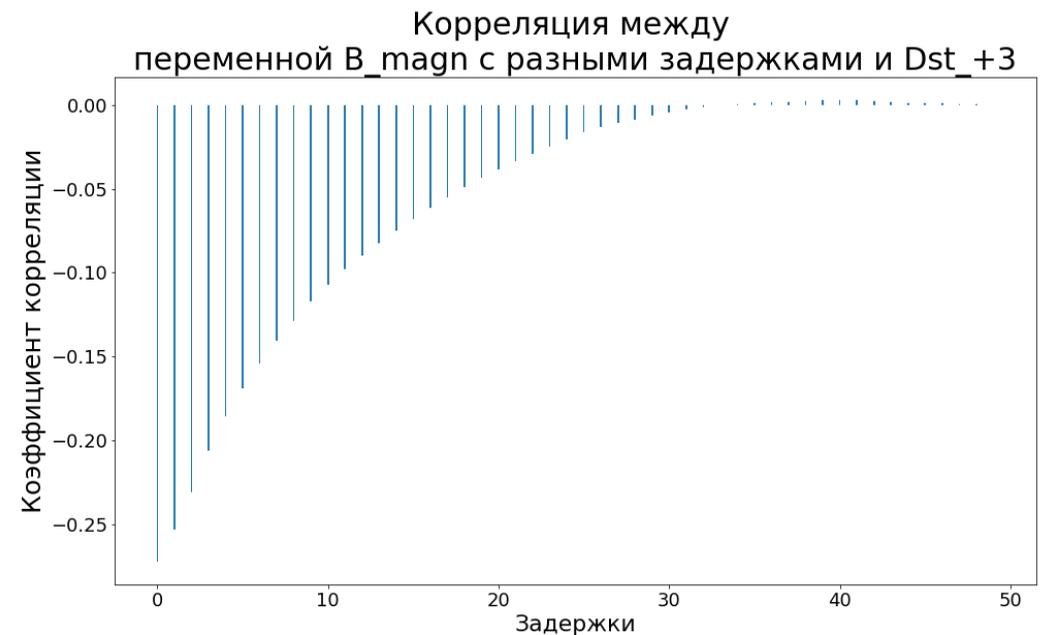
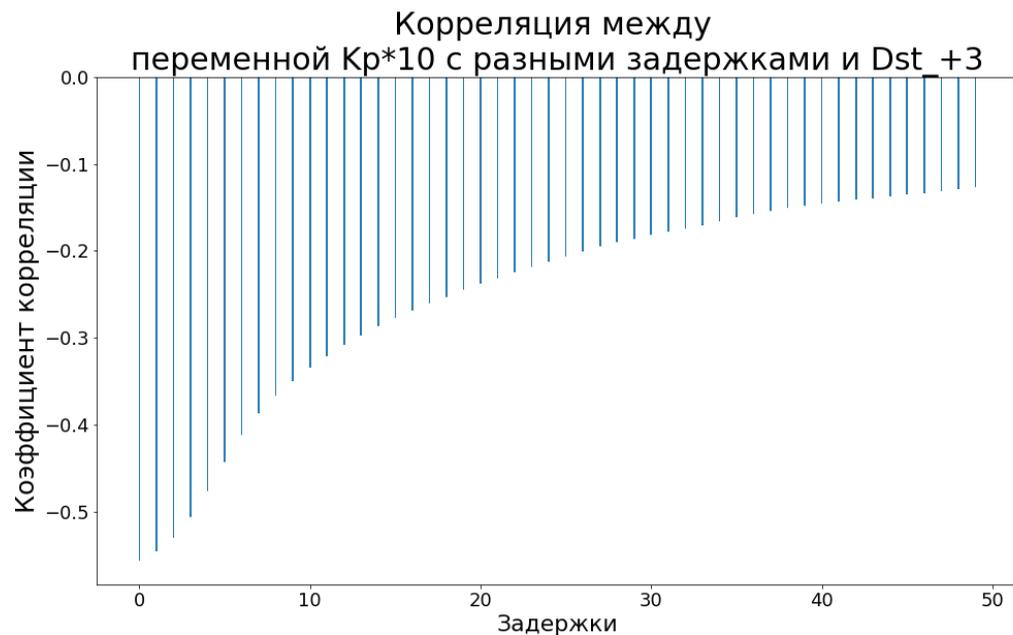
- Параметры СВ  
(скорость, плотность, температура)
- Параметры ММП ( $B_z$ ,  $B_{\text{magn}}$ )
- Индексы Dst и Кр



# Результаты отбора на первом этапе для Dst

В наборе остались:

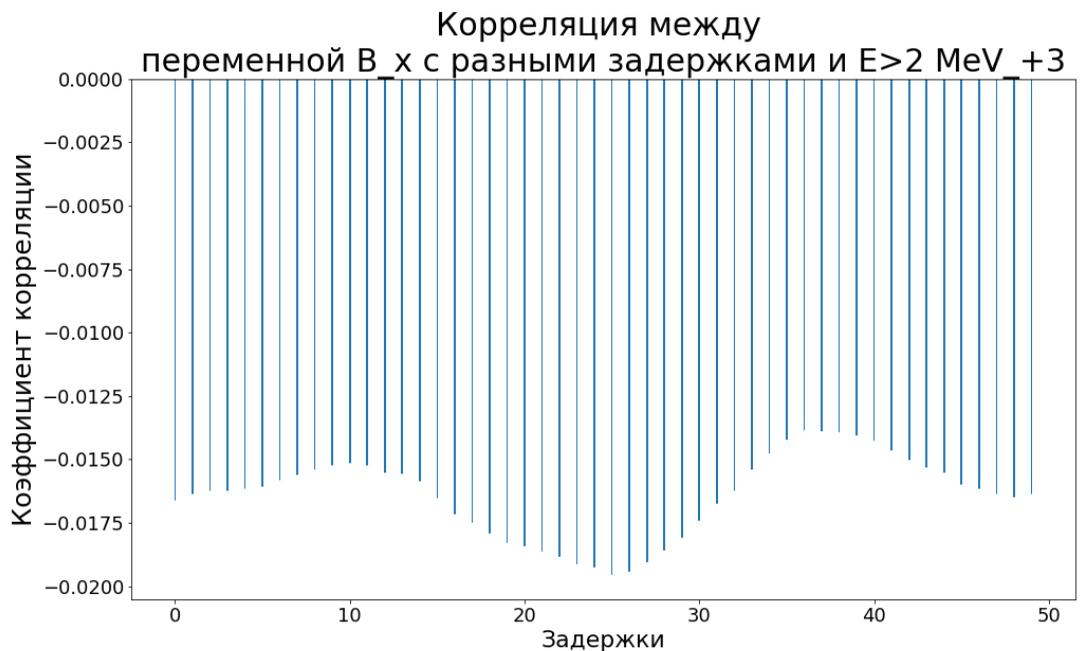
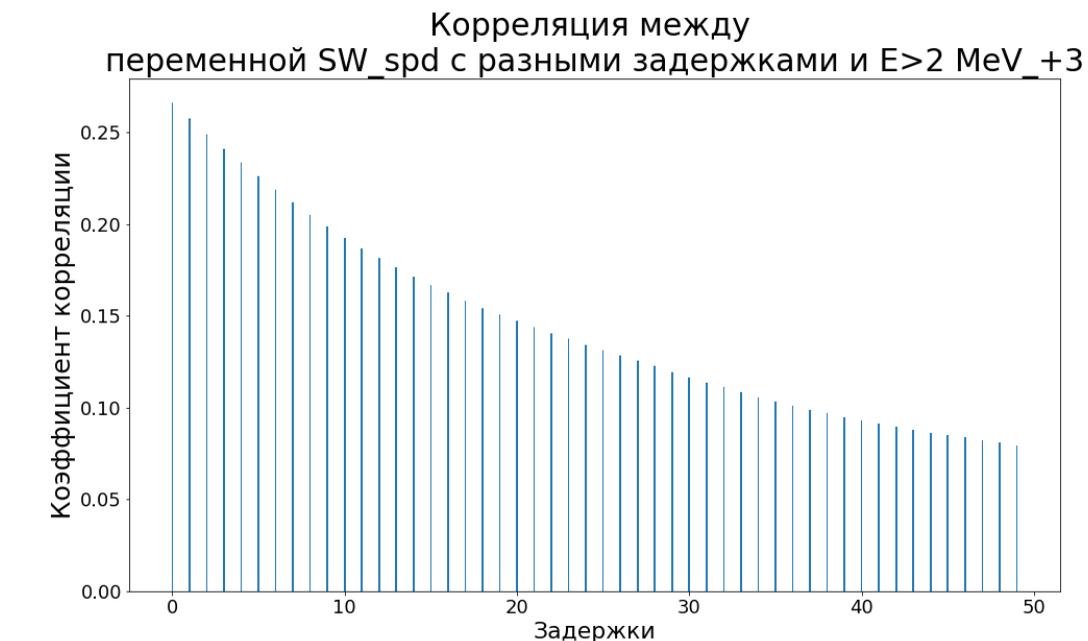
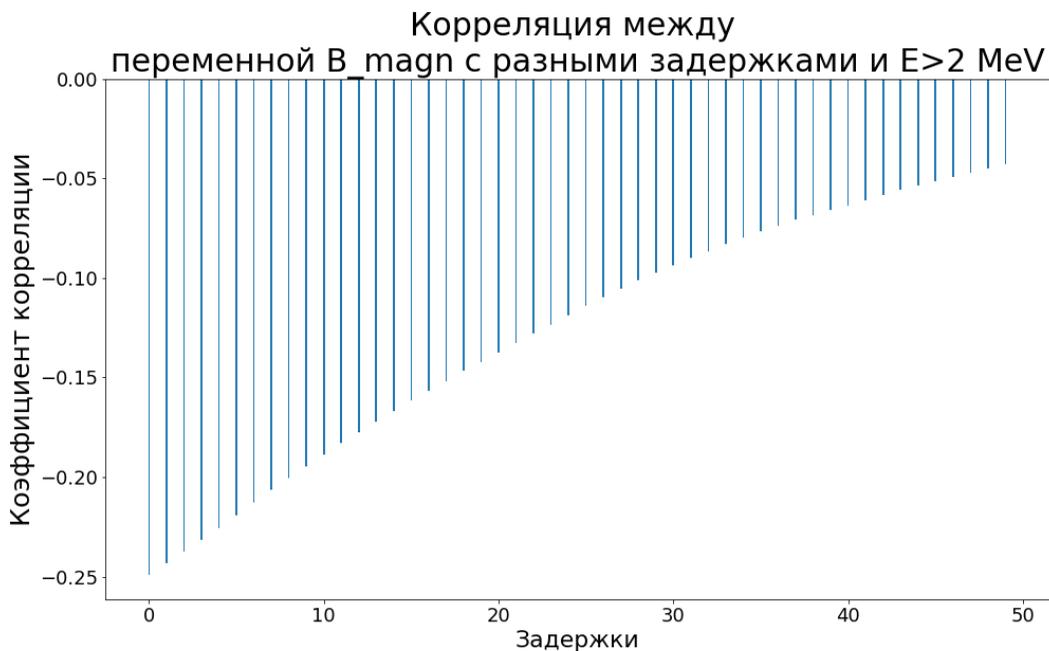
- Параметры СВ  
(скорость, плотность, температура)
- Параметры ММП ( $B_z$ ,  $B_{\text{magn}}$ )
- Индексы Dst и Kp



# Результаты отбора на первом этапе для $E > 2 \text{ MeV}$

В наборе остались:

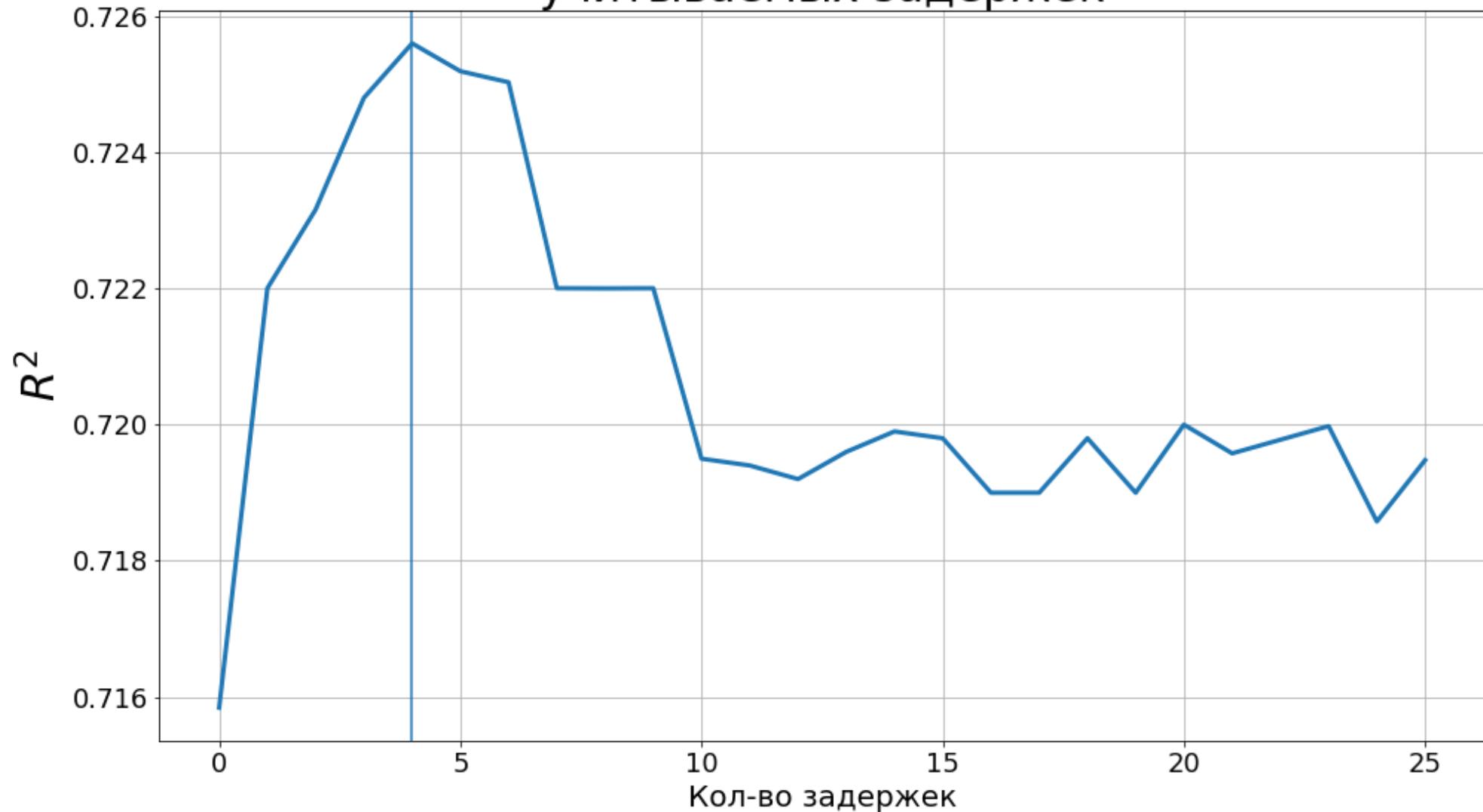
- Параметры СВ (скорость, плотность)
- Параметры ММП ( $B_{\text{magn}}$ )
- Индекс Dst
- Поток электронов  $E > 2 \text{ MeV}$



# Результаты отбора на втором этапе для Кр

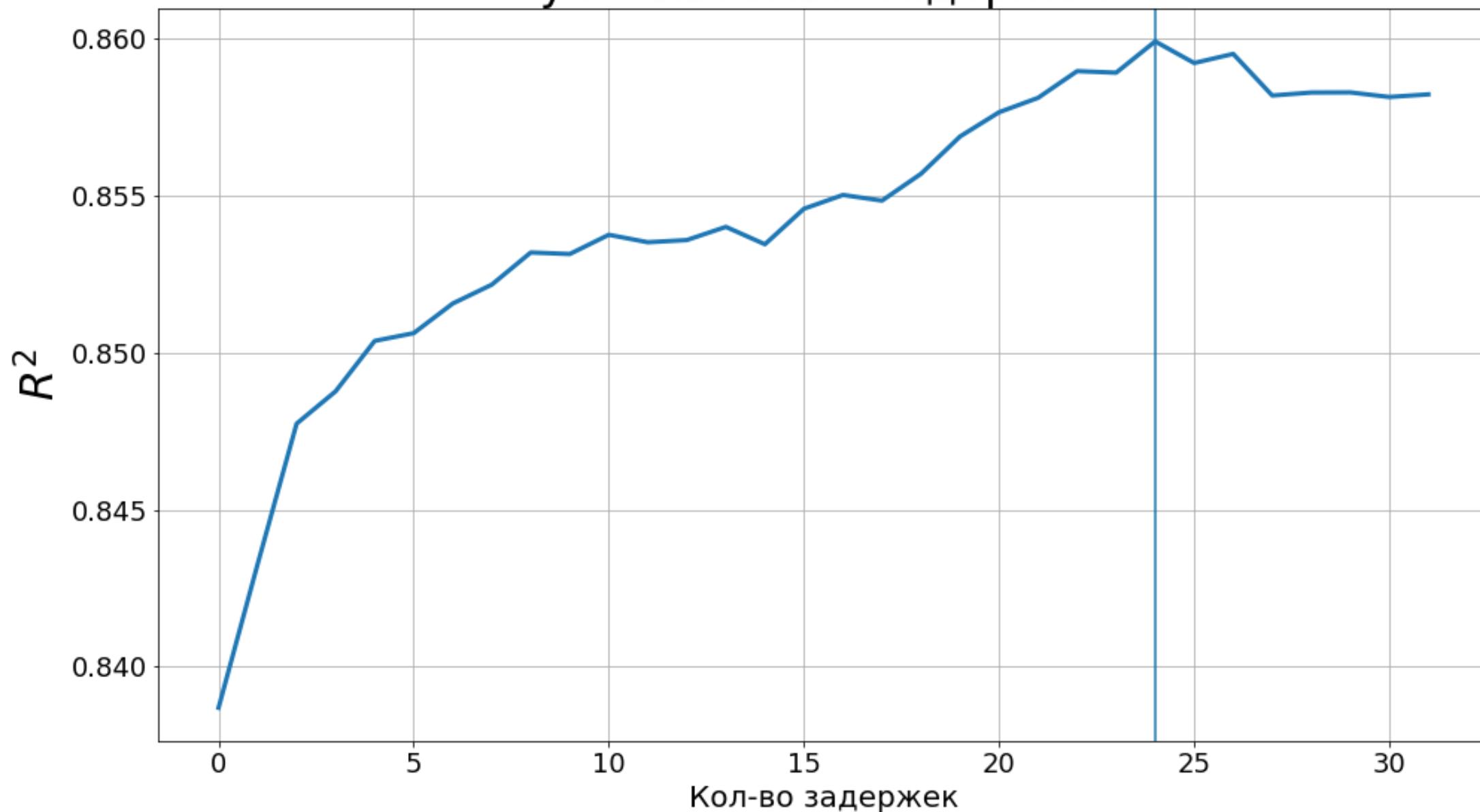
На втором этапе система определила оптимальный набор, состоящий из полученных на первом этапе физических переменных в текущий момент времени плюс значения в каждый из 4 предыдущих часов

Качество погнотирования в зависимости от количества учитываемых задержек



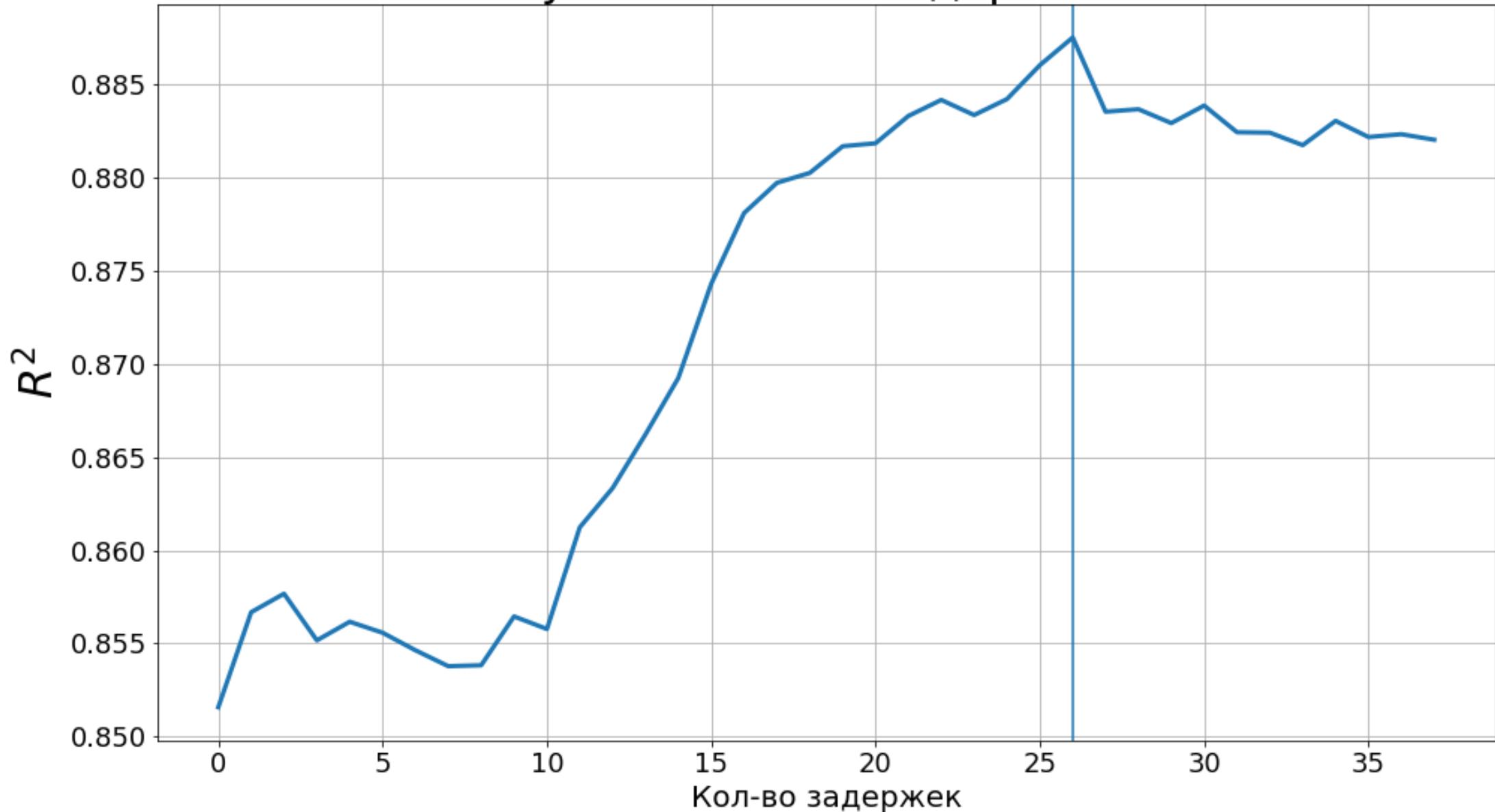
# Результаты отбора на втором этапе для Dst

Качество прогнозирования в зависимости от количества учитываемых задержек



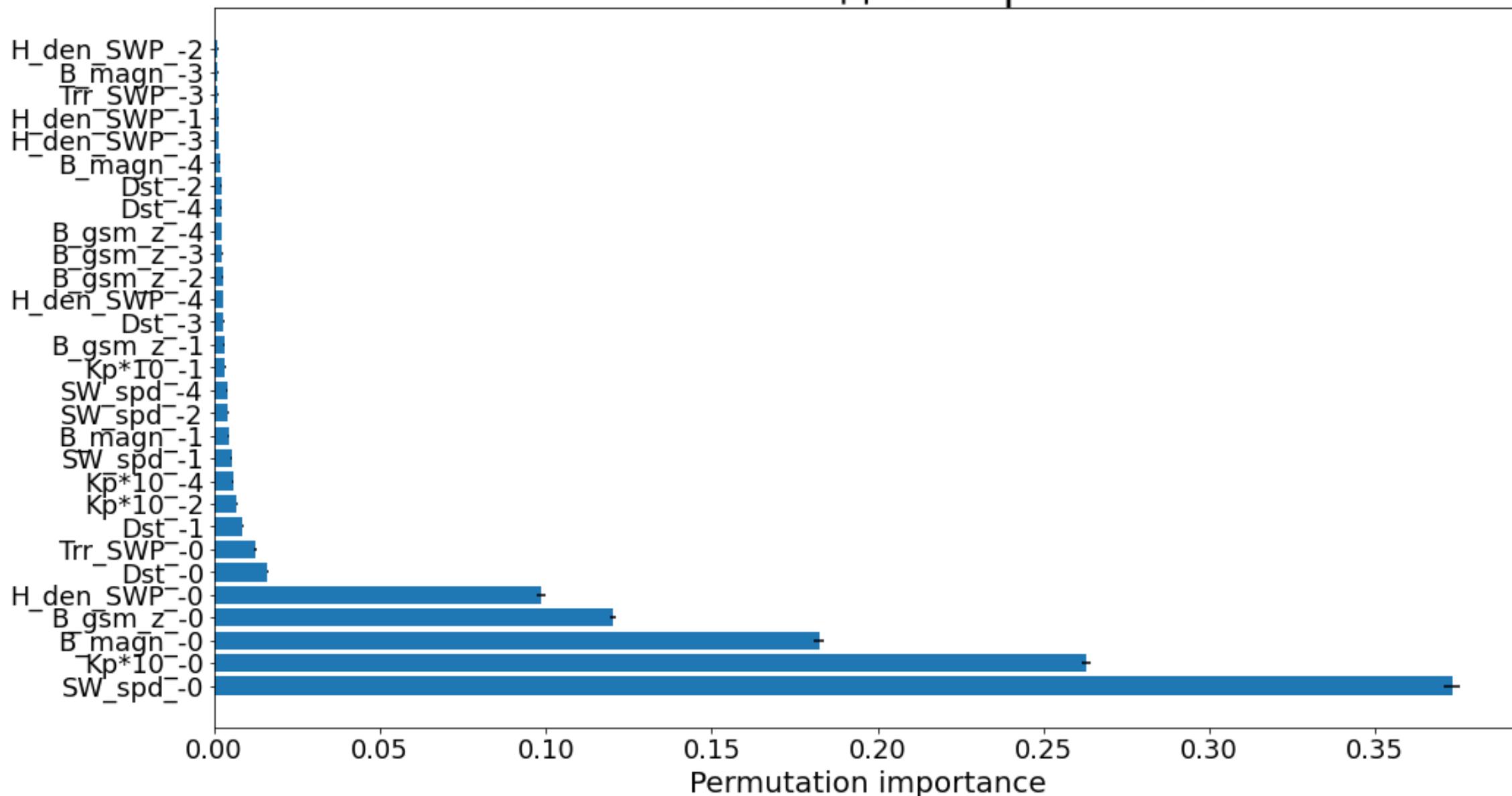
# Результаты отбора на втором этапе для $E > 2 \text{ MeV}$

Качество прогнозирования в зависимости от количества учитываемых задержек



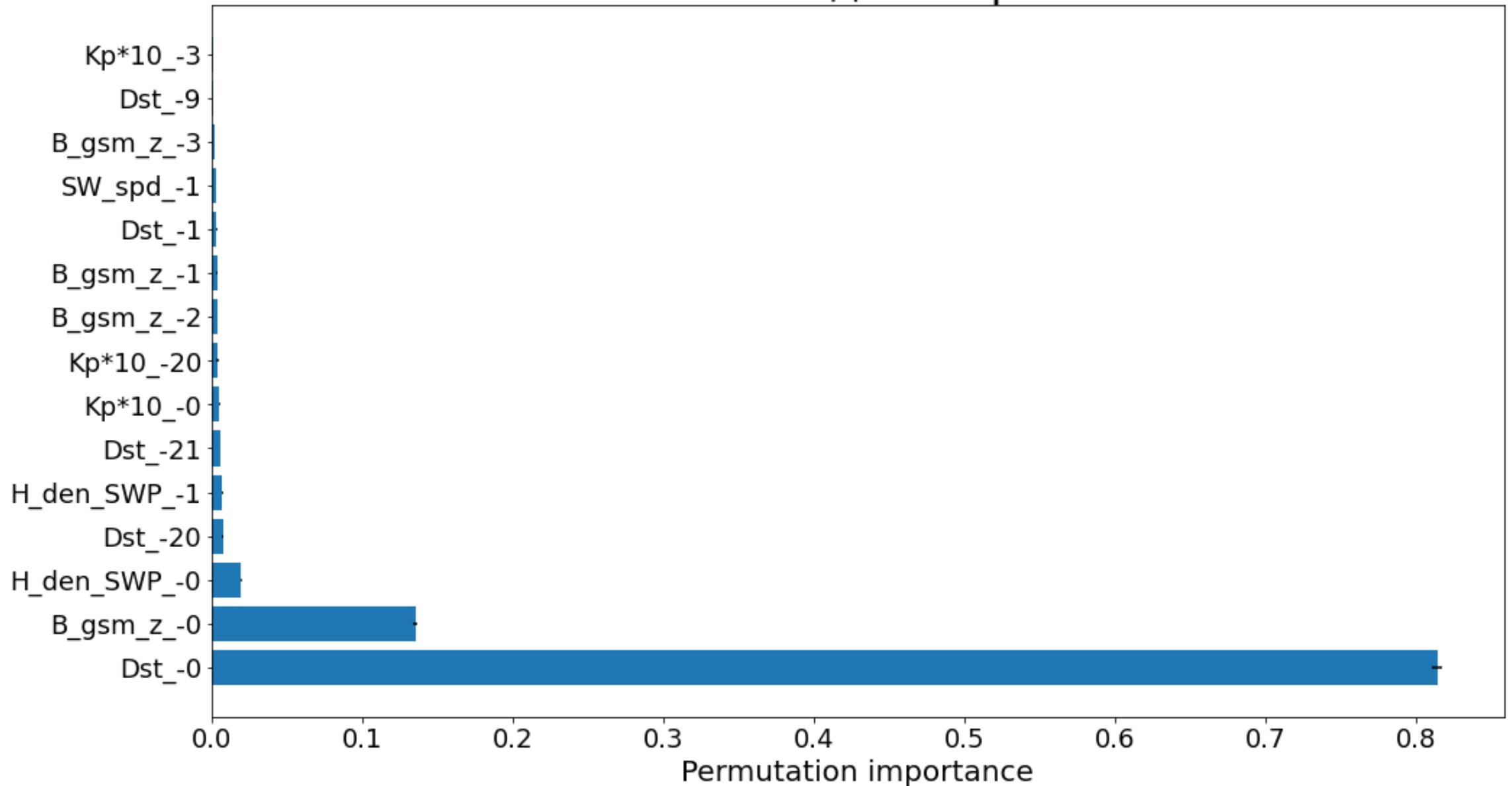
# Результаты отбора на третьем этапе для Кр

## Важность входных признаков



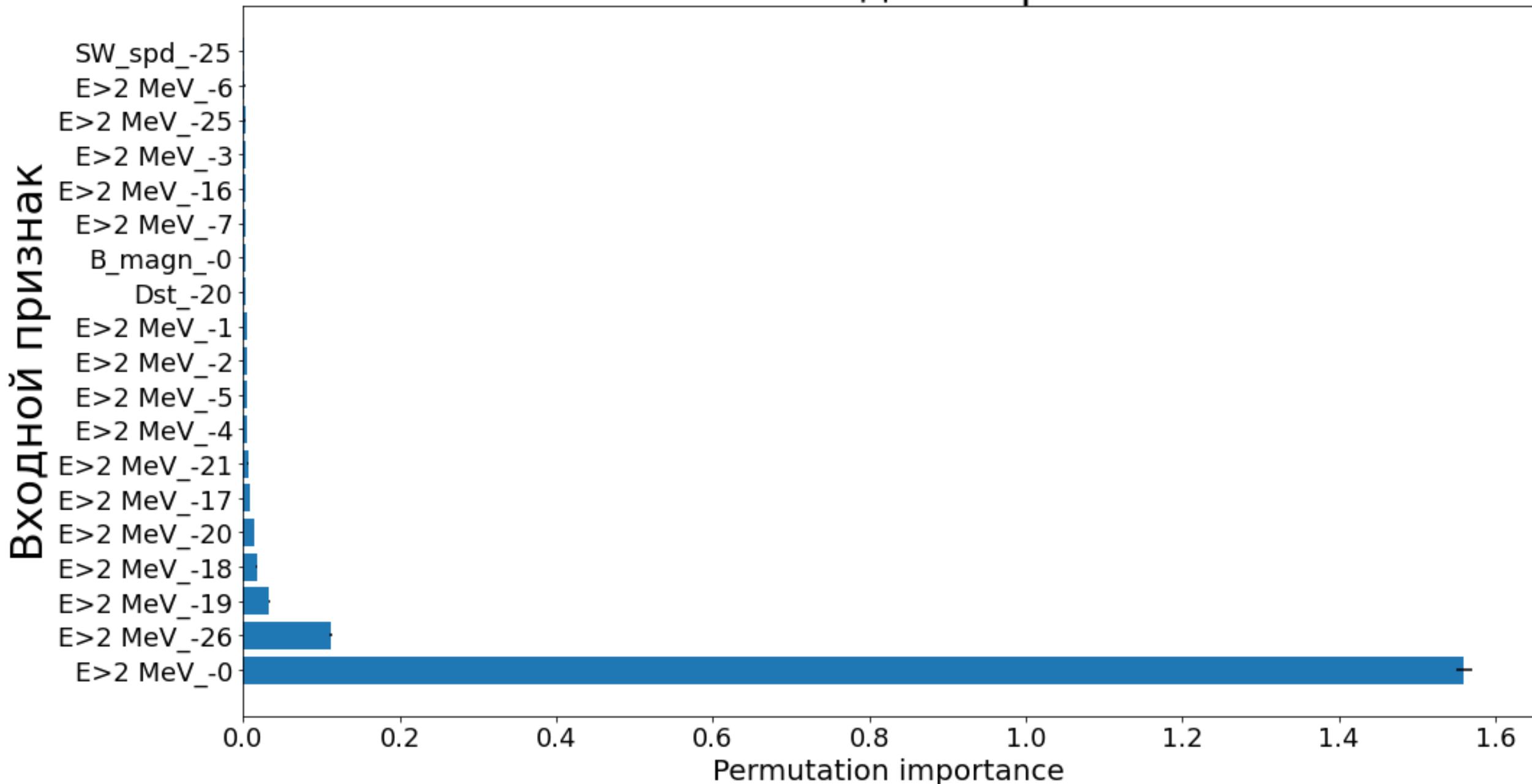
# Результаты отбора на третьем этапе для Dst

## Важность входных признаков

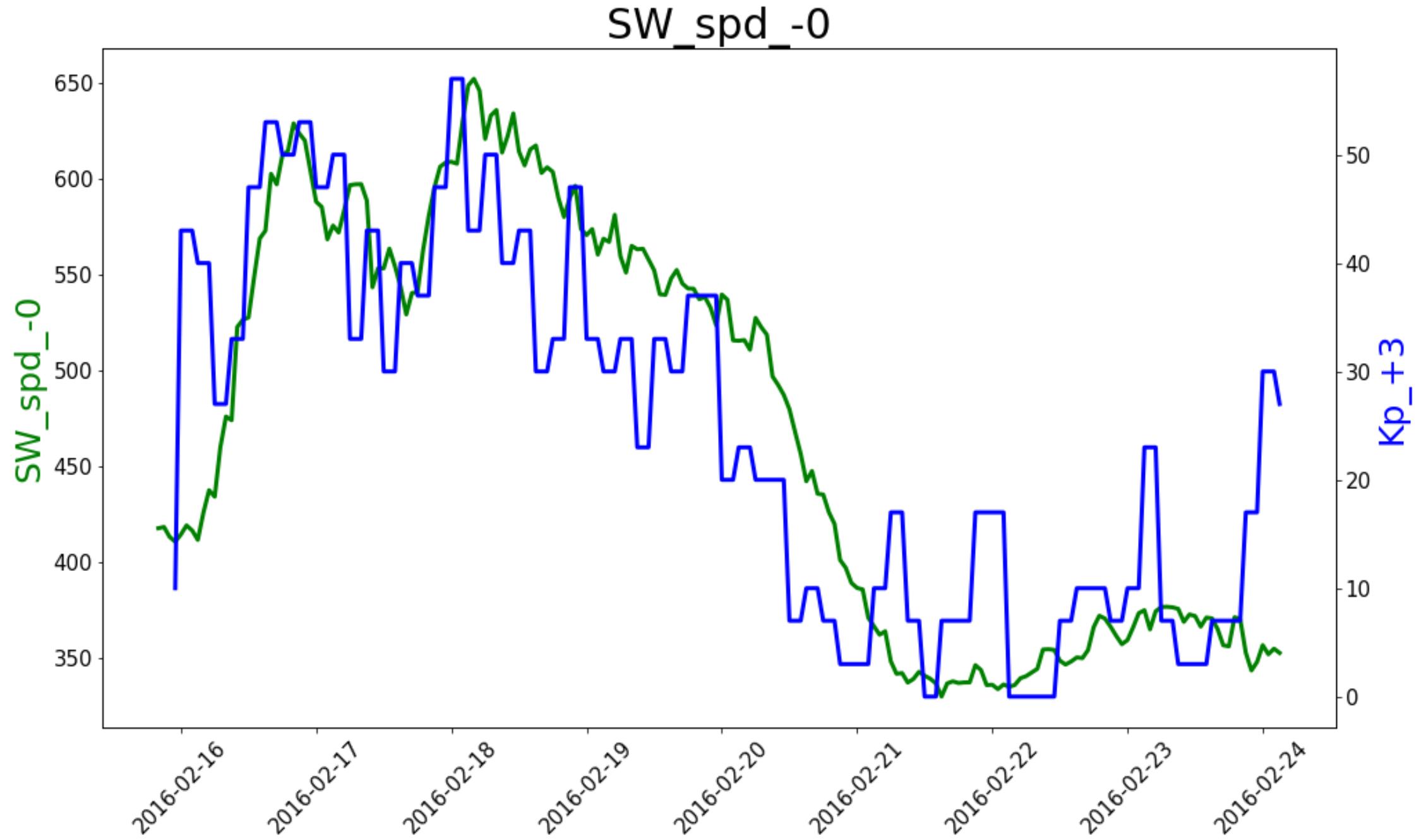


# Результаты отбора на третьем этапе для $E > 2 \text{ MeV}$

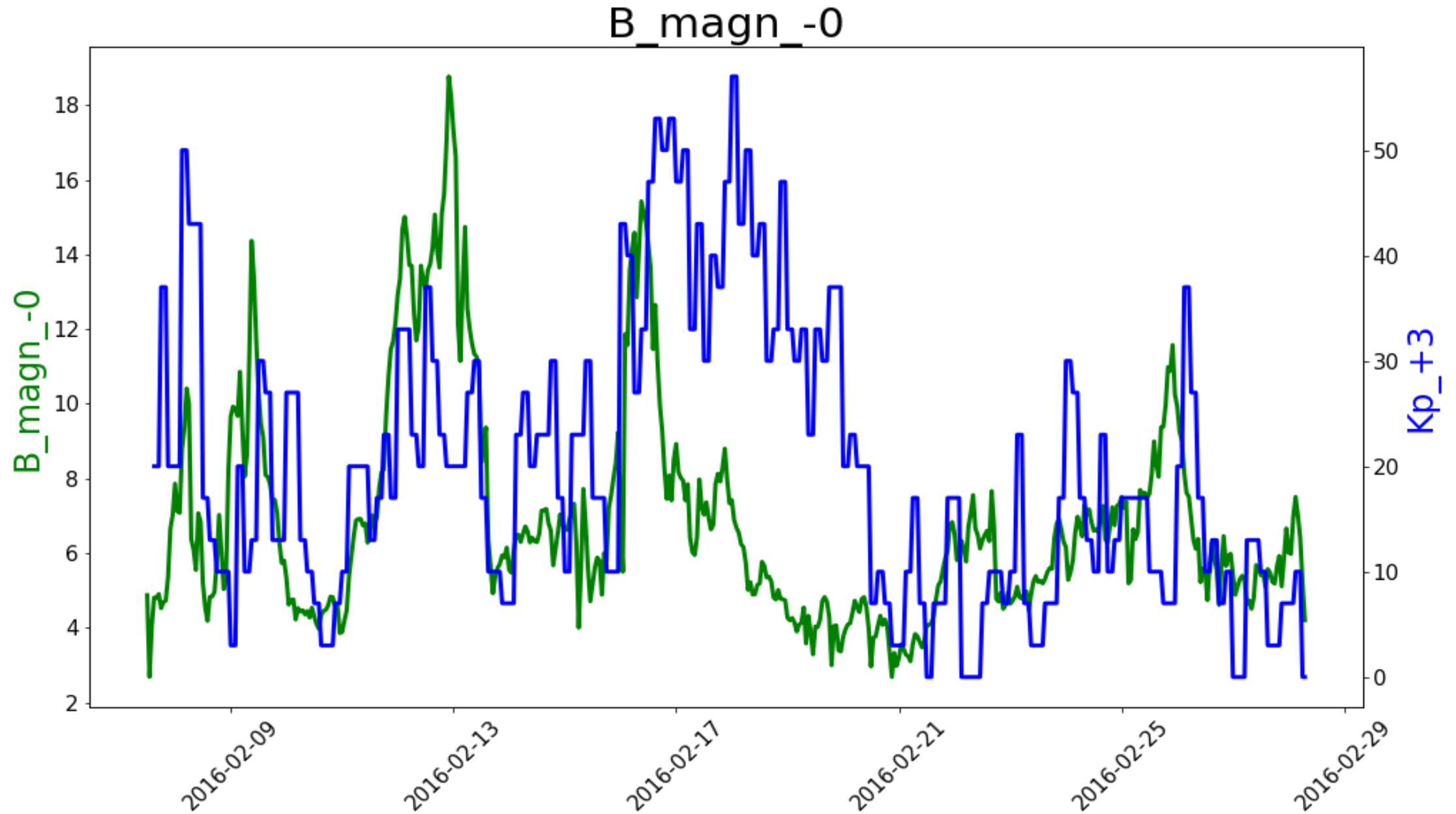
## Важность входных признаков



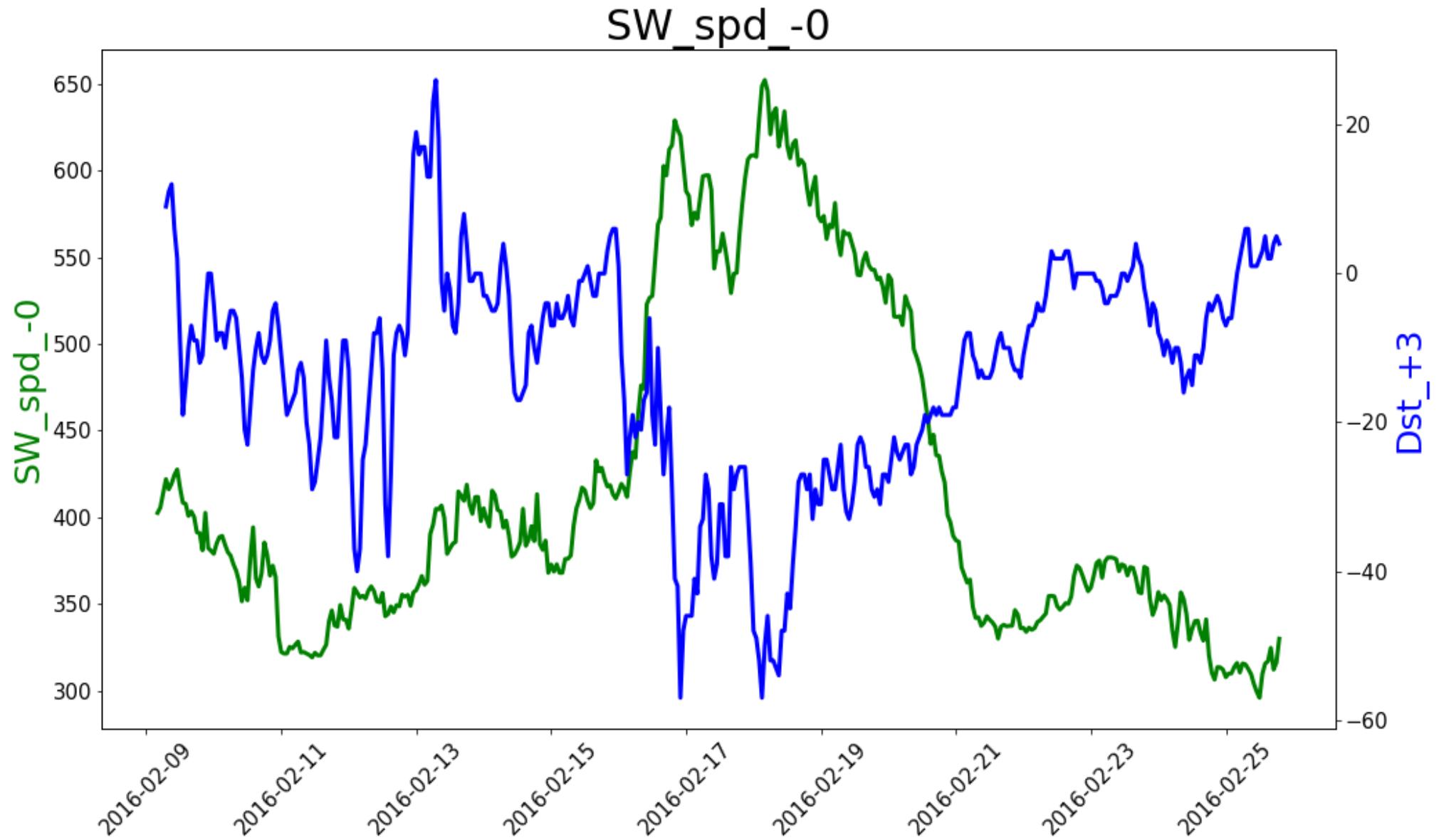
# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для Кр



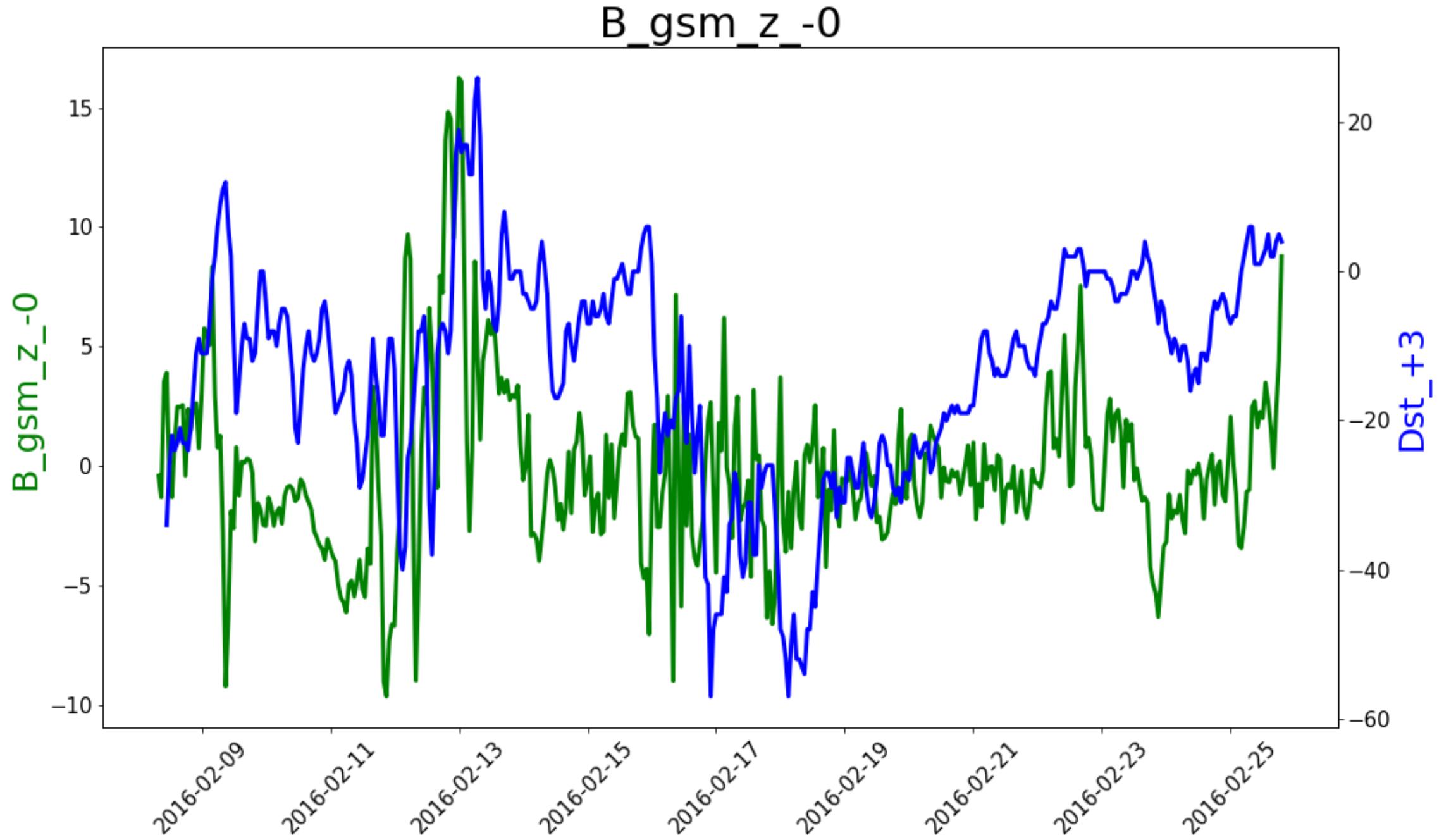
# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для Кр



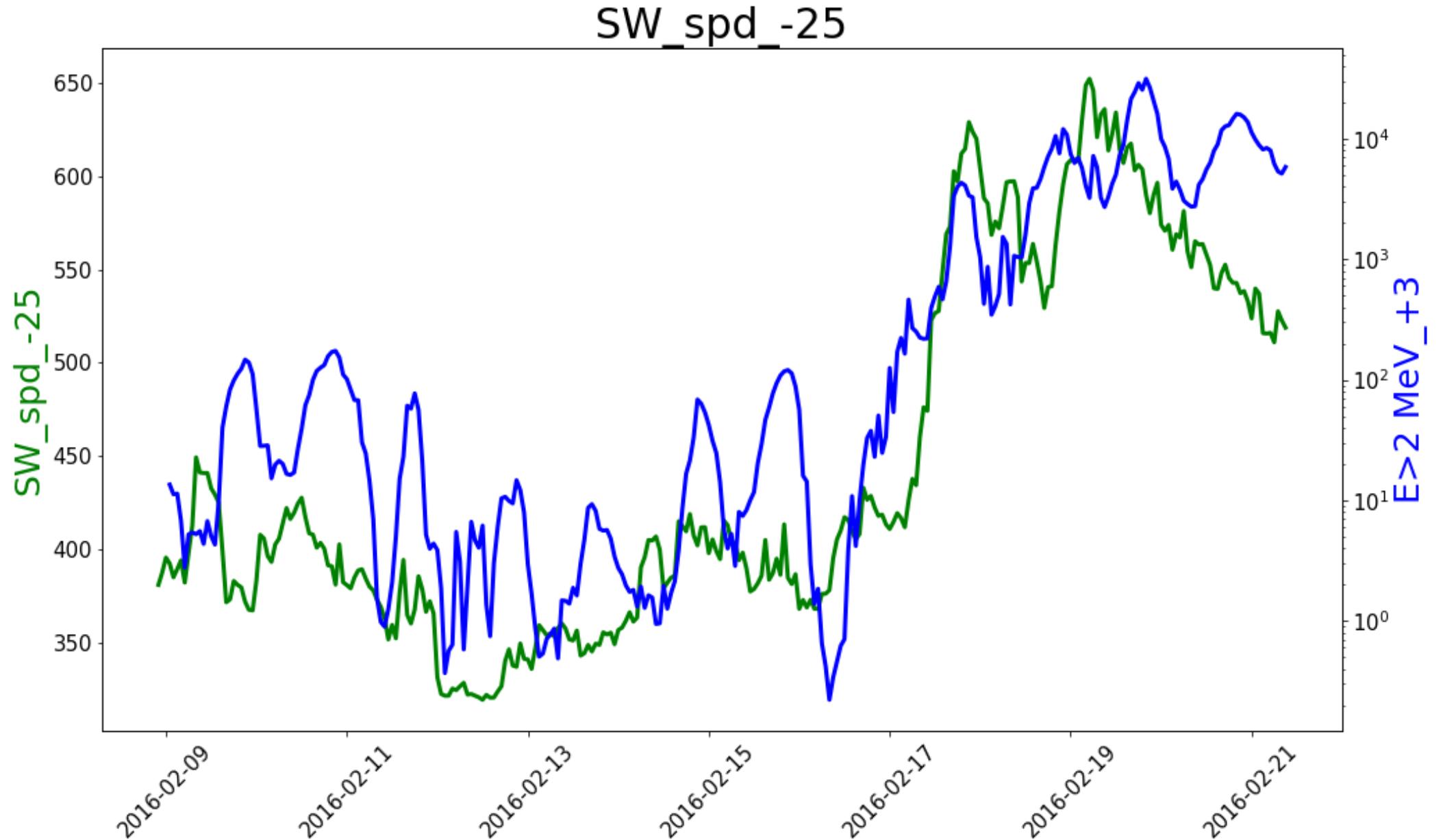
# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для Dst



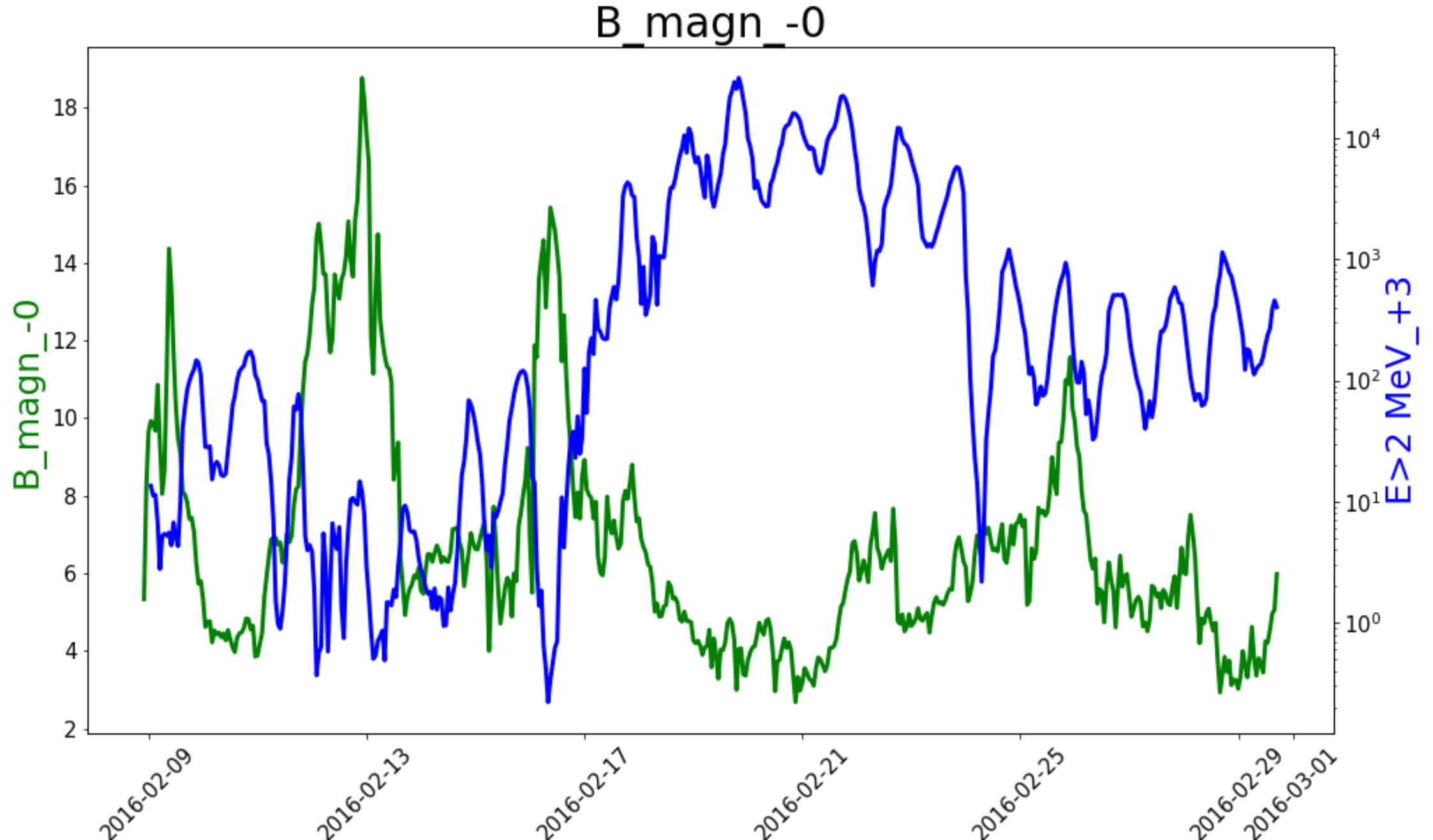
# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для Dst



# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для $E > 2 \text{ MeV}$



# Визуализация данных, определенных системой как самые важные, для $E > 2 \text{ MeV}$



# Коэффициент детерминации для каждой модели в сравнении с тривиальной

	Kp	Dst	E > 2 MeV
Градиентный бустинг	0,725	0,855	0,854
Тривиальная модель	0,549	0,733	0,726

# Выводы

1. Выполнено применение 4-ступенчатой системы для прогнозирования Kp и Dst индексов, а также для электронов с энергиями выше 2 МэВ, на 3 часа вперед.
2. В результате работы алгоритма были отобраны следующие физические признаки со следующими задержками:

## **Индекс Kp:**

1. Скорость СВ (0,1,2,4), Плотность протонов в СВ (0, 1, 2, 3, 4), Температура (0, 3),
2. Kp-индекс (0, 1, 2, 4), Dst-индекс (0, 1, 2, 3, 4),
3. модуль  $V_{magn}$  (0,1,3,4), компонента  $B_z$ (0,1,2,3,4)

## **Индекс Dst:**

1. Скорость СВ (0,1,2,4), Плотность протонов в СВ (0, 1)
2. Kp-индекс (0, 3, 20), Dst-индекс (0, 1, 9 20, 21)
3. Компонента  $B_z$ (0,1,2,3)

## **Потоки электронов:**

1. Скорость СВ (25)
2. Модуль  $V_{magn}$  (0)
3. Потоки электронов (0 – 26)

**Спасибо за внимание!**