

Enhancing the Quality of Kp Index Machine Learning Forecasting Using Higher-Frequency Data and Feature Transformations

I.M.Gadzhiev, I.N.Myagkova, O.G.Barinov, S.A.Dolenko

D.V.Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V.Lomonosov Moscow
State University, Moscow, Russia

Предсказание геомагнитных возмущений

- Геомагнитные возмущения – это один из наиболее важных факторов космической погоды.
- Они могут вызывать **нарушения в работе радиосвязи, трубопроводов, линий электропередач и электрических сетей.**
- Прогнозирование возмущений может помочь в борьбе с этими проблемами



Планетарный индекс Кр

Один из наиболее используемых геомагнитных индексов – планетарный индекс **Кр** ($Kp \in [0,9]$, с шагом 1/3)

Кр – средневзвешенное К-индексов, полученных в 13 обсерваториях. К-индекс выводится из максимальных флуктуаций горизонтальных составляющих магнитного поля Земли, наблюдаемых на магнитометре в течение 3-х часов

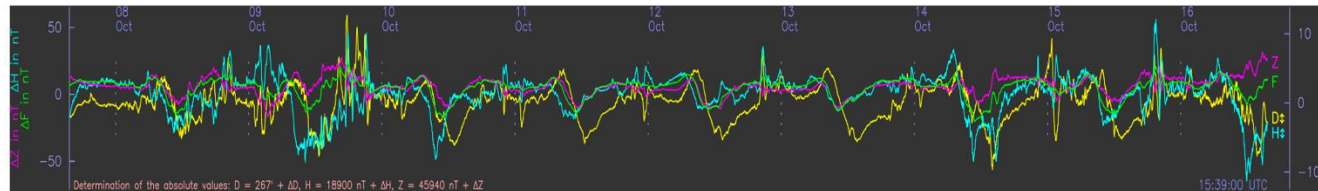
GFZ

Helmholtz Centre
POTSDAM

Search

Homepage |  |  | Privacy policy | Imprint |

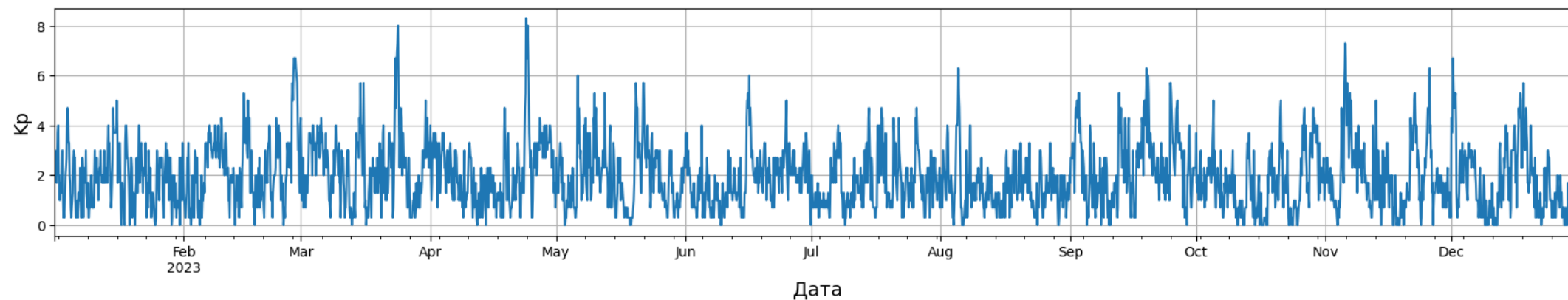
HELMHOLTZ CENTRE POTSDAM
GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE
FOR GEOSCIENCES



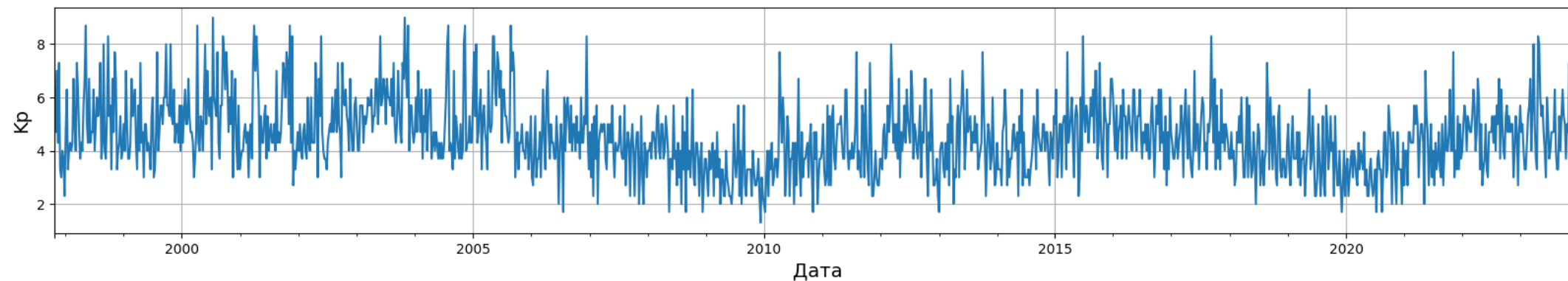
<https://isdg.gfz-potsdam.de/kp-index/>

Динамика индекса Кр

Динамика за 2023 год

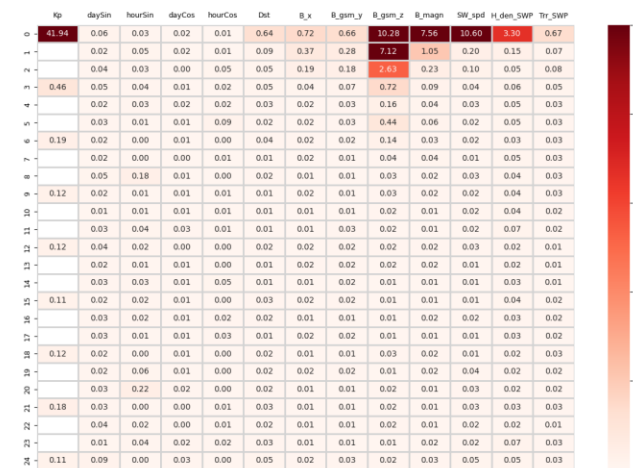
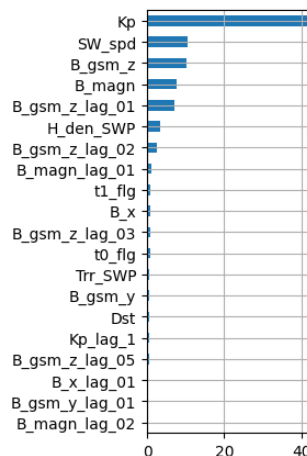
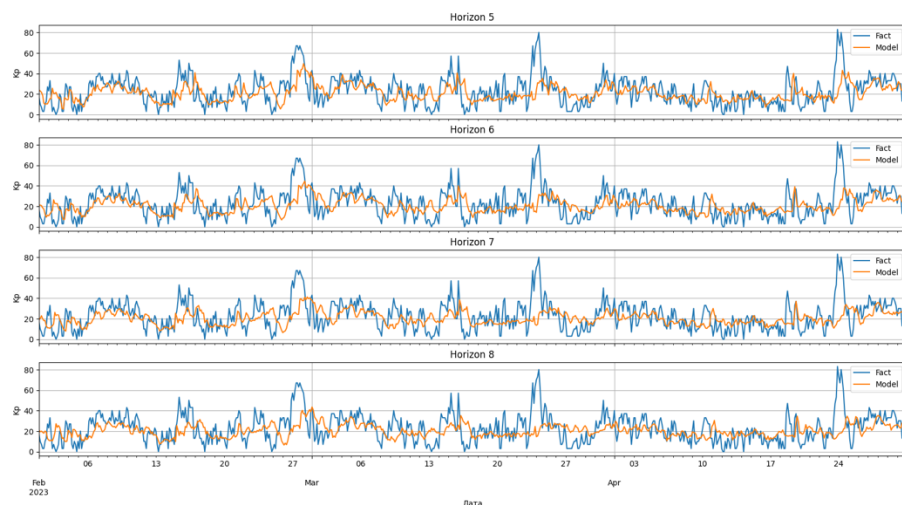


Недельные максимумы с 1997



Цель исследования

- Исследование возможностей улучшения качества прогноза Кр-индекса на 24 часа вперед с помощью данных 5-минутной частоты и преобразования признаков;
- Анализ признаков, влияющих на предсказание выбранной модели.



Задача прогнозирования

Имея данные за все предыдущие моменты времени,
ставится задача предсказать 8 следующих значений Кр.

Будем называть значением Кр на i -м горизонте i -тое следующее значение Кр. Для каждого горизонта обучаем отдельную модель.

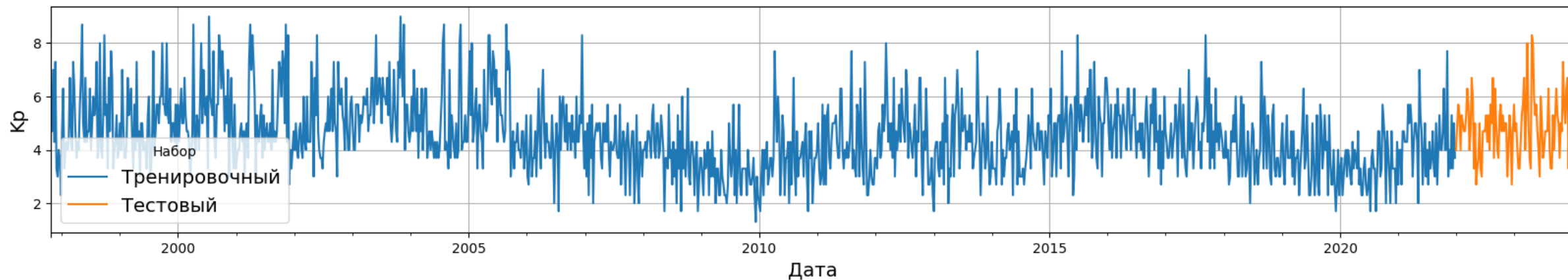
Прогнозирование реализуется следующим образом:

- В 00:00, 03:00, 06:00 ... (**T0** часы), **предсказываем Кр-индекс от 3 до 24 часов вперед включительно с шагом в 3 часа;**
- В 02:00, 05:00, 08:00, ... (**T1** часы), **предсказываем Кр-индекс от 1 до 22 часов вперед включительно с шагом в 3 часа;**
- В 01:00, 04:00, 07:00, ... (**T2** часы), **предсказываем Кр-индекс от 2 до 23 часов вперед включительно с шагом в 3 часа;**

Качество прогнозирования

В качестве **тестового набора** для оценки качества работы моделей был использован интервал значений всех переменных за **2022-2024** годы.

Недельные максимумы Кр с разбиением на тренировочный и тестовый наборы:



Метрики качества

Главная используемая (в т.ч. и в предыдущих исследованиях) метрика - **корень из среднего квадрата ошибки (среднеквадратичная ошибка, RMSE).**

Мы измеряем ее в двух вариантах:

- Усредняем по всем типам часов (**T0/T1/T2**). Сравниваем с тривиальной моделью (ТМ) – прогноз = предыдущее значение
- Измеряем только для **T0** часов.

Дополнительные метрики (по всем типам часов):

- R^2 – коэффициент множественной детерминации $([-\infty; 1])$
- Доля правильных ответов (**Accuracy**):
Кр-индекс – дискретная величина, можно пытаться измерять качество классификации вместо регрессии

Данные для прогнозирования Kp

Переменная	Физическое описание
Kp	Индекс Kp 3-х часовой [1]
Dst	Индекс Dst [2]
B_x	Компонента x магнитного поля [3]
B_gsm_y	Компонента y магнитного поля (в системе GSM) [3]
B_gsm_z	Компонента z магнитного поля (в системе GSM) [3]
B_magn	Модуль магнитного поля [3]
SW_spd	Скорость солнечного ветра в точке Лагранжа L1 [3]
H_den_SWP	Плотность солнечного ветра в точке Лагранжа L1 [3]
Trr_SWP	Температура солнечного ветра в точке Лагранжа L1 [3]
dayCos, daySin, hourCos, hourSin	Информация о часе дня и дне года в виде тригонометрически функций

[1] German Research Center for Geosciences in Potsdam (GFZ) <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index>

[2] Kyoto Dst index service, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>

[3] The Ace Science Center, <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/>

Учет истории переменных

Погружение временных рядов

Из-за природы Кр-индекса для предсказания Кр-индекса нужно учитывать историю изменения данных до момента предсказания.

Для учета истории используется методика погружения временных рядов – вектор признаков дополняется векторами для N предыдущих моментов времени. N – глубина погружения.

Предыдущие исследования

- Выбиралась лучшая модель прогнозирования Kp на каждом горизонте и оптимальная для практического применения единой модели для всех горизонтов;
- Тестировались линейные модели, нейронные сети различной архитектуры, градиентный бустинг
- Проводилось исследование влияния признаков на результат прогнозирования;
- **Использовались часовые средние всех данных** (кроме Kp)
Gadzhiev I.M., Barinov O.G., Dolenko S.A., Myagkova I.N., Comparative Analysis of the Procedures to Forecast the Kp Geomagnetic Index by Machine Learning. Moscow University Physics Bulletin,
<http://dx.doi.org/10.3103/S002713492470231X>

И.М. Гаджиев, И.Н. Мягкова, О.Г. Баринов, С.А. Доленко, Прогнозирование индекса Kp при помощи машинного обучения [готовится к публикации]

Результаты предыдущих исследований

Лучшая модель и глубина погружения для каждого из горизонтов.

1 горизонт – **RMSE 0.562**, 8 – **RMSE 1.208**

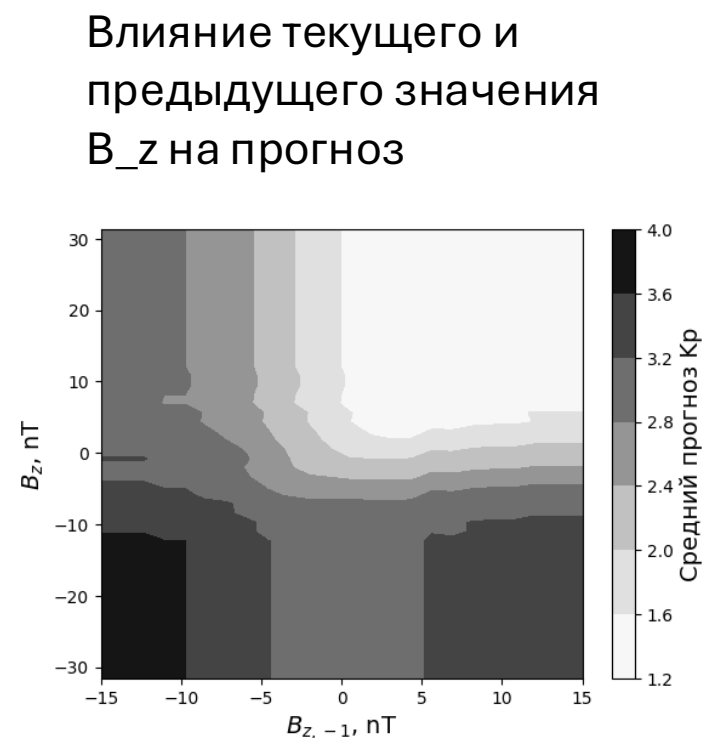
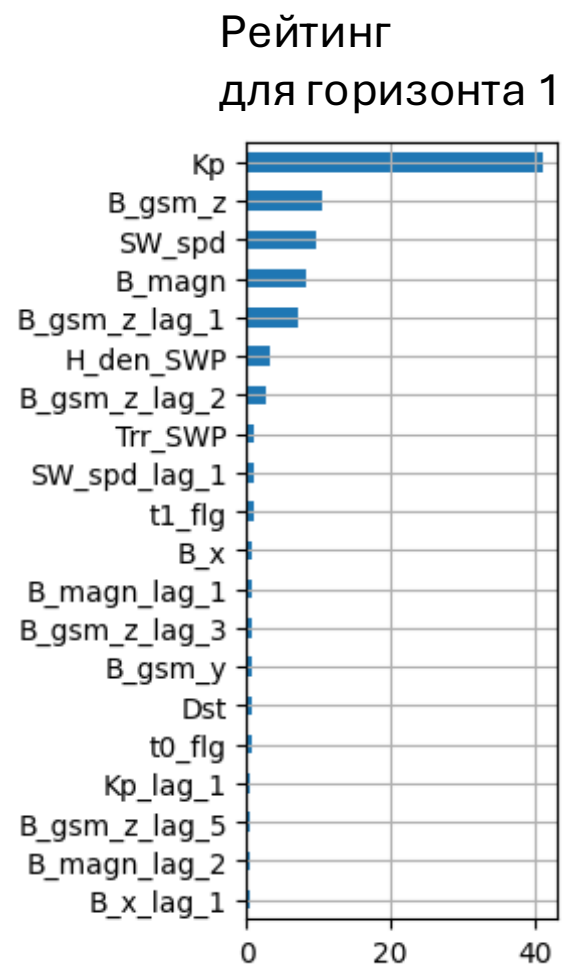
Везде лучше, чем тривиальная модель

Горизонт	Лучшая модель	Accuracy	RMSE	RMSE TM	RMSE T ₀	R ²
1	Catboost 9H	26.70%	0.562	0.903	0.613	0.805
2	Catboost 6H	18.70%	0.819	1.162	0.882	0.584
3	LSTM 48H	14.80%	0.976	1.284	1.005	0.411
4	Catboost 24H	13.60%	1.056	1.369	1.075	0.31
5	Catboost 9H	12.80%	1.111	1.438	1.126	0.236
6	Catboost 48H	12.20%	1.155	1.494	1.166	0.175
7	Catboost 72H	11.60%	1.186	1.542	1.196	0.129
8	Catboost 72H	11.50%	1.208	1.575	1.215	0.097

CatBoost с погружением в 9 часов показывает результаты, сравнимые с лучшими на каждом из горизонтов

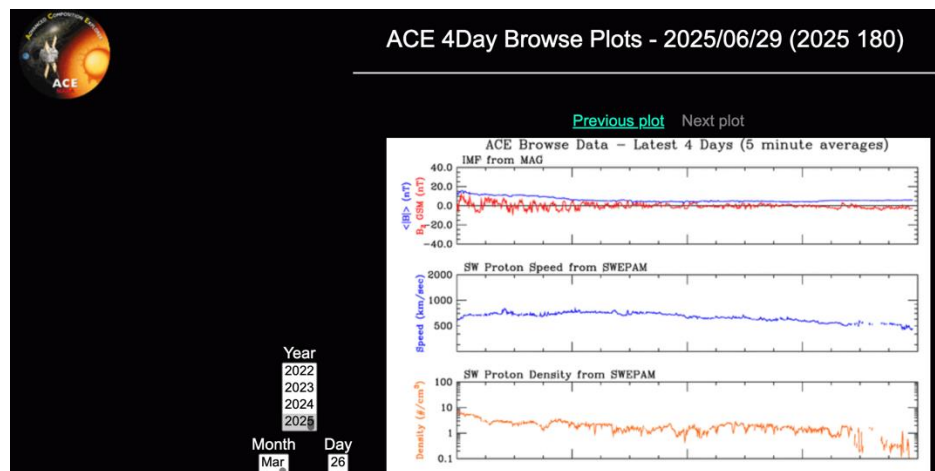
Интерпретация признаков

- Заметили, что среди предыдущих значений наиболее важными являются предыдущие значения B_z ($B_gsm_z_lag_*$);
- Прогнозируемое значение растет, если текущее и предыдущее B_z резко отрицательны;
- Вид зависимости прогноза подсказывает, что модели нужно большее разрешение по частоте.



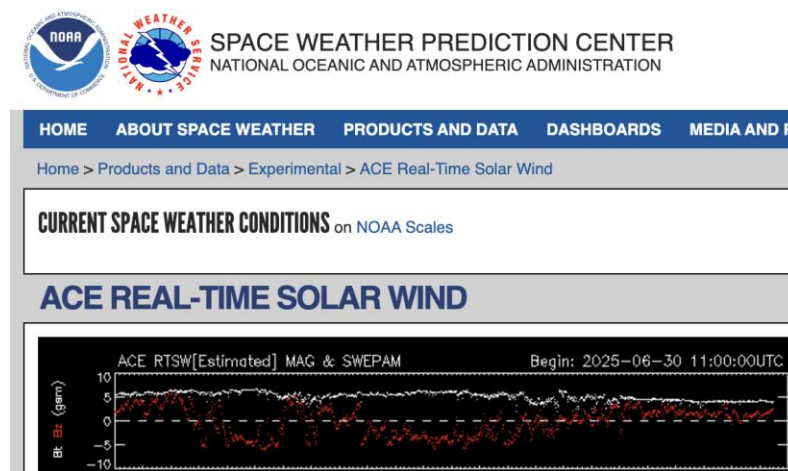
Источники данных с ACE

ACE Science Center (Browse data)



Большое количество данных
с ACE в 5-минутном и
часовом усреднении
(в т.ч. ММП и СВ).
Передаются раз в день

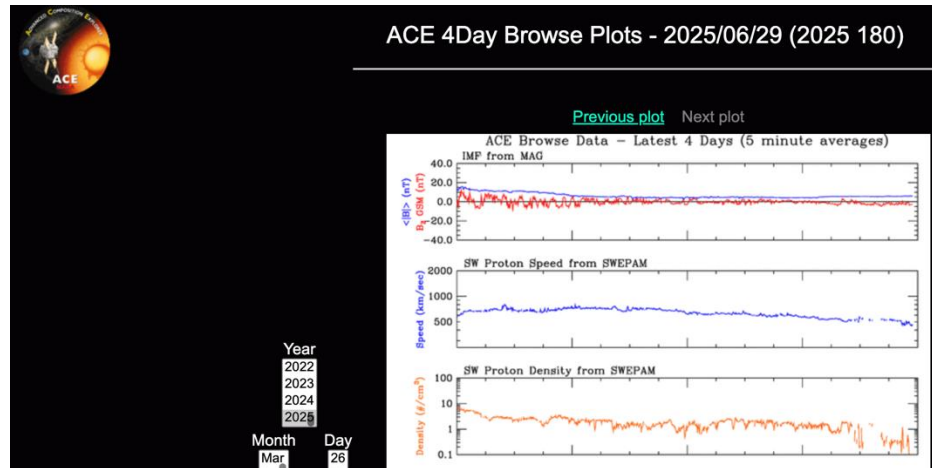
NOAA Real Time Solar Wind



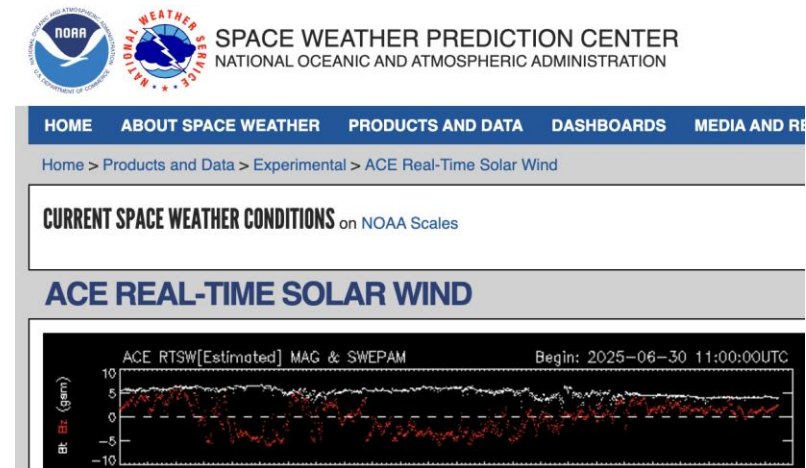
Данные ММП и СВ
в 1-минутном усреднении,
передаются
в реальном времени.
Много пропусков

Источники данных с ACE

**ACE Science Center
(Browse data)**



**NOAA
Real Time Solar Wind**



Можно использовать для обучения моделей
5-минутные данные ММП и СВ
ACE Science Center,
т.к. их можно получать в реальном времени
из минутных данных NOAA

Часовые и пятиминутные данные для прогнозирования Kp

Переменная	Используемая частота данных
Kp [1]	3ч
Dst [2]	1ч
B_x [3]	1ч + 5мин
B_gsm_y [3]	1ч + 5мин
B_gsm_z [3]	1ч + 5мин
B_magn [3]	1ч + 5мин
SW_spd [3]	1ч + 5мин
H_den_SWP [3]	1ч + 5мин
Trr_SWP [3]	1ч + 5мин
dayCos, daySin, hourCos, hourSin	1ч

Способ использования 5-минутных данных:

Считаем статистики
внутри часа:

- Стандартное отклонение
- Минимум, максимум
- Квантили (0.1, 0.25, 0.5,
0.75, 0.9)

[1] German Research Center for Geosciences in Potsdam (GFZ) <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index>
[2] Kyoto Dst index service, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>
[3] The Ace Science Center, <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/>

Дополнительные данные и агрегации для прогнозирования Кр

Все данные 1ч+5мин

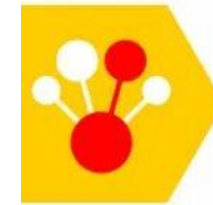
Можно получать в реальном времени (NOAA)

Переменная	Физическое описание
Ion_vlo	Поток ионов 47-68 keV
Ion_lo	Поток ионов 115-195 keV
Ion_mid	Поток ионов 310-580 keV
Ion_hi	Поток ионов 1060-1900 keV
e_lo	Поток электронов 38-53 keV
e_hi	Поток электронов 175-315 keV
H	Поток протонов 761-1220 keV
H_lo	Поток протонов 1.6-4.7 MeV
H_hi	Поток протонов 4.7-10.4 MeV

Дополнительные агрегации:
(внутри часа)
- Перекос (skew)
- Первое и последнее значения

Модели

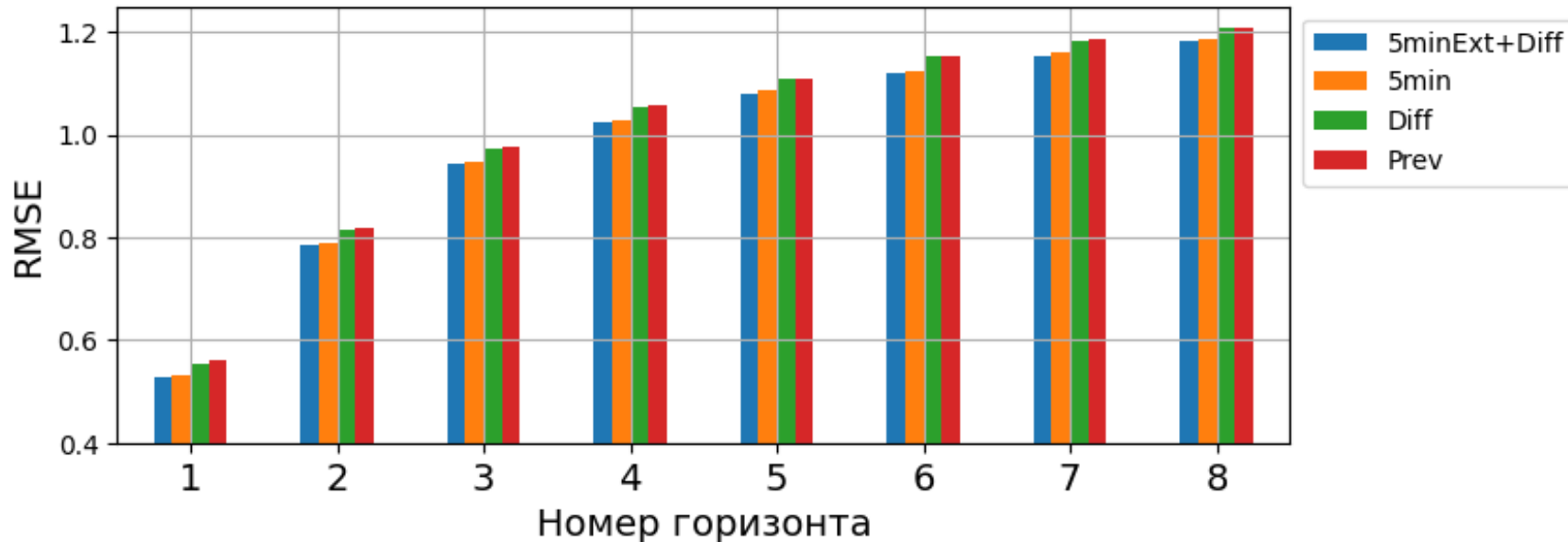
- Градиентный бустинг: реализация CatBoost
 - Макс глубина деревьев = 3, макс число деревьев 10000, ранняя остановка после 50
- Глубины погружения – 9, 12, 24 часа
- Сравниваем с лучшими моделями на исходных часовых признаках из предыдущих исследований - **Prev**
- Тестируем следующие варианты
 - Исходные + разности признаков - **Diff**
 - Исходные + 5-минутные признаки – **5min**
 - Исходные + 5-минутные (расширенный список) + разности признаков + **5minExt+Diff**



CatBoost

Результаты

- Сравнение лучших предыдущих результатов (лучшая модель, лучшее погружение) с лучшими новыми (лучшее погружение);
- Наибольший эффект дает использование 5-минутных данных;
- Использование разностей дает небольшой эффект;
- Лучший результат достигается при одновременном использовании 5-минутных данных и разностей.



Результаты

- 1 горизонт RMSE **0.562** -> **0.527**, 8-й горизонт - 1.210 -> 1.814;
- Стабильнее всего работает CatBoost с погружением в 9 часов, что соотносится с предыдущими исследованиями.

	Prev		Diff		5min		5minExt+Diff	
Горизонт	Лучшая модель	RMSE	Лучшая модель	RMSE	Лучшая модель	RMSE	Лучшая модель	RMSE
1	Catboost 9H	0.562	Catboost 12H	0.554	Catboost 9H	0.530	Catboost 12H	0.527
2	Catboost 6H	0.819	Catboost 9H	0.817	Catboost 12H	0.789	Catboost 9H	0.786
3	LSTM 48H	0.976	Catboost 9H	0.972	Catboost 9H	0.948	Catboost 9H	0.943
4	Catboost 24H	1.056	Catboost 24H	1.053	Catboost 9H	1.029	Catboost 9H	1.025
5	Catboost 9H	1.110	Catboost 48H	1.110	Catboost 12H	1.087	Catboost 9H	1.080
6	Catboost 48H	1.155	Catboost 48H	1.151	Catboost 12H	1.125	Catboost 9H	1.121
7	Catboost 72H	1.186	Catboost 9H	1.183	Catboost 12H	1.160	Catboost 9H	1.154
8	Catboost 72H	1.210	Catboost 48H	1.208	Catboost 9H	1.185	Catboost 24H	1.184

Результаты при использовании 5-минутных данных и разностей

Стабильнее всего работает CatBoost с погружением в 9 часов,
Далее везде будем рассматривать эту модель

Горизонт	Лучшая модель	Accuracy	RMSE	RMSE T_0	R^2
1	Catboost 12H	28.1%	0.527	0.581	0.828
2	Catboost 9H	18.9%	0.786	0.852	0.617
3	Catboost 9H	15.4%	0.943	0.974	0.449
4	Catboost 9H	14.0%	1.025	1.046	0.349
5	Catboost 9H	12.9%	1.080	1.095	0.277
6	Catboost 9H	12.3%	1.121	1.132	0.222
7	Catboost 9H	11.7%	1.154	1.164	0.174
8	Catboost 24H	11.6%	1.184	1.192	0.132

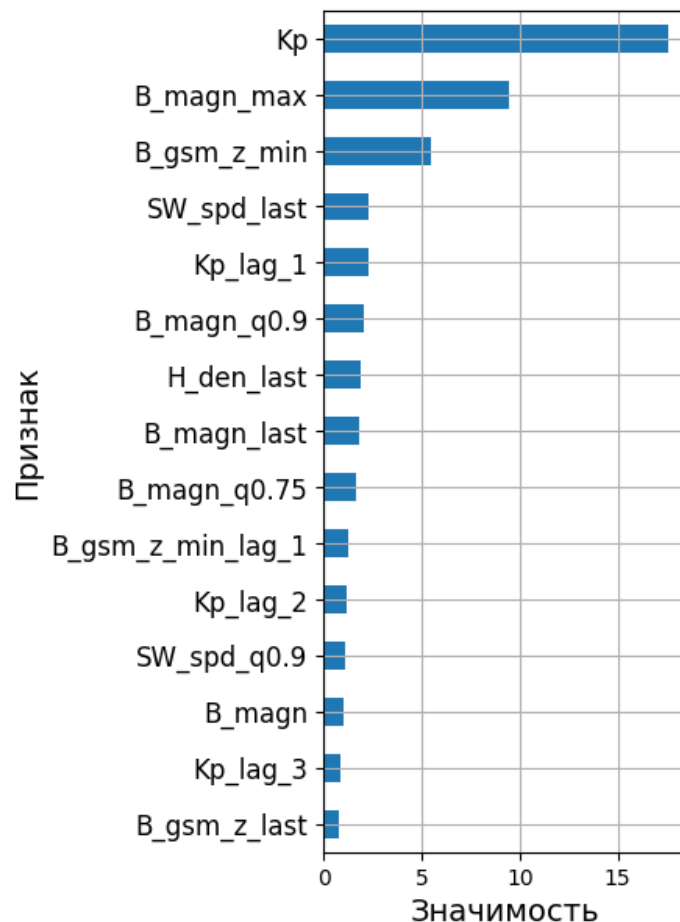
Значимость признаков

Главные 5 признаков (всего **3910!**)
(4 из них из 5-минутных данных!):

- **Kp**
- **B_magn_max** (макс. 5-минутное B);
- **B_gsm_z_min** (мин. 5-минутное B);
- **SW_spd_last** (последнее 5-минутное SW_spd);
- **Kp_lag_1** (предыдущее Kp)

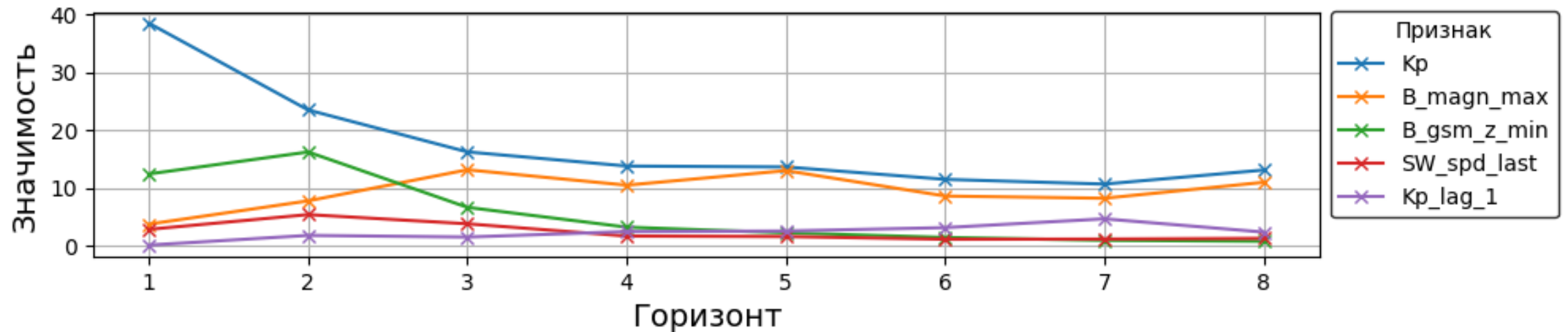
Статистики по 5-минутным данным
«вытесняют» средние часовые
(а не дополняют их)

Усредненная
по всем горизонтам
значимость



Значимость главных 5 признаков по горизонтам

- На первых горизонтах большее значение имеют **Kp** и **B_gsm_z_min**;
- С увеличением горизонта растет роль **B_magn_max**;
- Подобная картина согласуется с предыдущими исследованиями



Выводы

- Использование расширенных 5-минутных данных вместе с разностями улучшает качество прогнозирования Кр-индекса - Горизонт 1 **RMSE 0.562 -> 0.527**, Горизонт 8 – **1.208 -> 1.184**;
- Модель для практического использования – **CatBoost с 9 часами** погружения (согласуется с предыдущими результатами);
- Главные 5-признаков: **текущее значение Кр, макс. модуля ММП, минимум Vz ММП, макс. Скорости СВ, предыдущее значение Кр.** Статистики, посчитанные по 5-минутным данным используются моделью как полная замена средних;
- Текущее значение Кр и мин. Vz ММП имеют большое значение на первых горизонтах, на последних возрастает роль макс. модуля ММП

Спасибо за внимание!

Р.С. Значимость главных 5 признаков по горизонтам (предыдущие исследования)

- На первых горизонтах большее значение имеют K_p и B_{gsm_z} ;
- С увеличением горизонта растет роль B_{magn} ;

