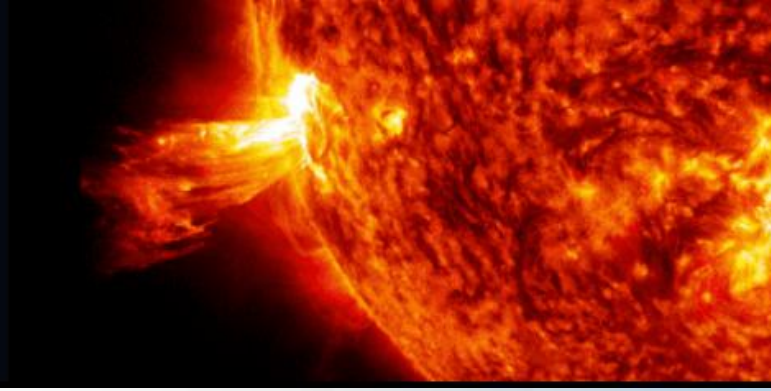
ИЗМИРАН
ПРОГНОЗ 2023



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ В ЦЕНТРЕ АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НИИЯФ МГУ

Мягкова И.Н. , **Доленко С.А., Широкий В.Р., Гаджиев И.М., Владимиров Р.Д. , Ефиторов А.О., Шугай Ю.С., Баринова В.О, Баринов О.Г., Калегаев В.В.**

**НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия*

**irina@srd.sinp.msu.ru*

НИИЯФ МГУ

План доклада

- Кто мы - Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ
- Решаемые задачи: что и как мы прогнозируем
- Многомерные временные ряды и задачи прогнозирования состояния динамических систем
- Магнитосфера Земли и факторы, влияющие на её состояние: входные данные для прогнозирования
- Основные результаты за 2012-2022 г.г.
- Направления дальнейшей работы

Космическая погода **swx.sinp.msu.ru**

НИИЯФ МГУ

ГЛАВНАЯ | КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА | ИНСТРУМЕНТЫ | ПРИЛОЖЕНИЯ | 3D МАГНИТОСФЕРА | МОДЕЛИ | О ПРОЕКТЕ

Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ

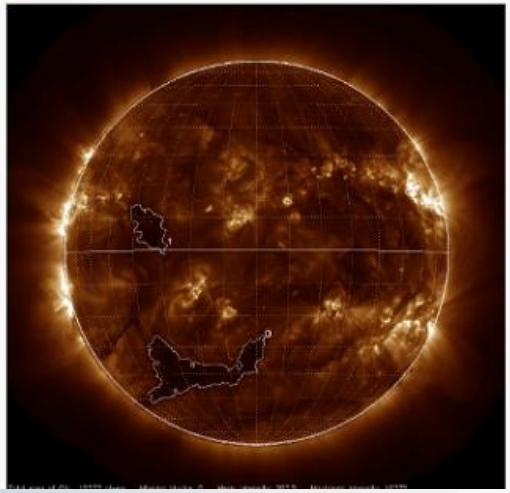
Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ предоставляет информацию о текущем состоянии околоземного космического пространства. Информационные сервисы (*SWX*) на Интернет-сайте центра обеспечивают доступ к актуальным данным, характеризующим уровень солнечной активности, геомагнитного и радиационного состояния магнитосферы и гелиосферы в режиме реального времени. Для анализа данных используются модели космической среды, работающие в автономном режиме. Интерактивные сервисы позволяют извлекать и анализировать данные в заданные моменты времени. *SWX* - гибкая система для анализа и прогнозирования космической погоды в околоземном космическом пространстве.

Интернет-портал SWX разработан при поддержке Министерства образования и науки РФ, контракты №07.514.11.4020 и №14.604.21.0049.

Текущие условия в околоземном космическом пространстве (2023-05-29 10:05:05 UT)

Солнце | Магнитосфера | Спутники на орбите | Данные

Корональные дыры



Одним из проявлений солнечной активности являются повторяющиеся высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ). ВСП СВ могут приводить к умеренным геомагнитным возмущениям на всех фазах цикла солнечной активности. Источником ВСП СВ являются корональные дыры (КД), видимые на изображениях Солнца в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах как области пониженной яркости.

На рисунке слева представлено текущее изображение Солнца, полученное прибором AIA (Atmospheric Imaging Assembly) на космическом аппарате NASA SDO (Solar Dynamics Observatory)на длине волны 193 Å. КД на рисунке выделены белым цветом.

Параметры и положение КД рассчитываются на основе алгоритма автоматического анализа изображений. Параметры КД используются для прогнозирование скорости квазистационарных ВСП СВ на околоземной орбите. В разделе “Космическая погода” представлены изображения Солнца в разных длинах волн и приведен прогноз скорости солнечного ветра вблизи точки либрации L1.

Space Monitoring Data Center

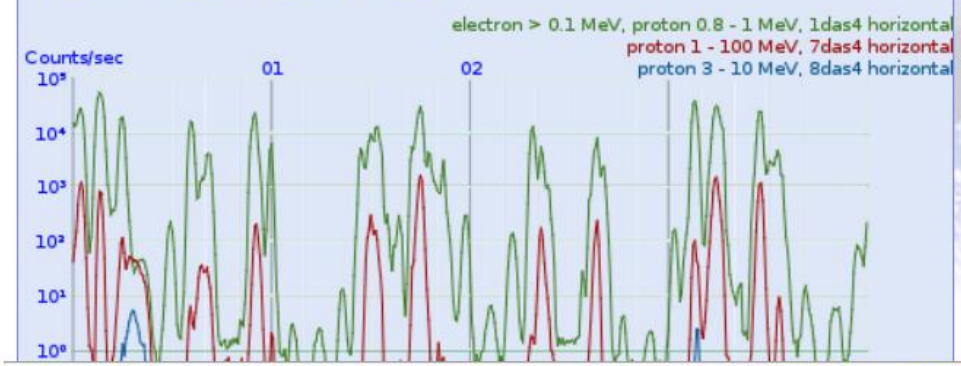
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU

Home | Data | Models | Links | About

Latest data from featured spacecrafts

Electro-L #2 skl, up to 29 May, 2023, 11:32 UT

Meteor-M#2 msgi, 26 May, 2023



Space weather now

Magnetopause monitor

Current stand-off distance:

R_{ss}=14.3 R_E

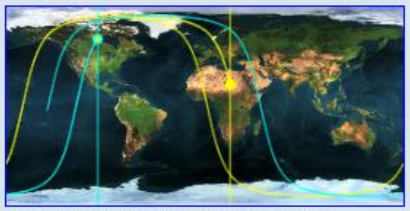
More

- Space weather by SEC/NOAA
- Solar images by SOHO
- Solar wind by ACE
- Dst (в реальном времени) из Центра Данных Киото WDC C2
- AE (для предварительной оценки) из Центра Даннных Киото WDC C2

NOAA N3KL Solar Activity Monitor

Solar X-rays	Geomagnetic field
NORMAL	QUIET

Satellites Location



Time: 2023-05-29 13:27:57 UTC

Meteor-M1

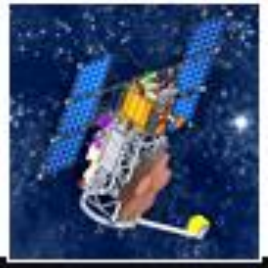
Location (GEO, km):

x = 6236.94 **y** = 2634.99 **z** = 2432.53

Location (Geodetic, degrees,km):

lat = 19.87 **lon** = 22.90 **alt** = 818.75

Developed in 2007. Copyright © 2007 - 2023 Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Moscow State University Feedback



CORONAS-F
2001

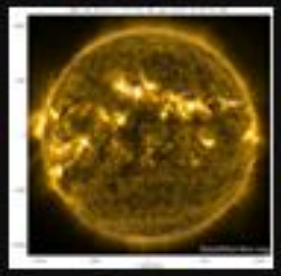
Tatiana1
2005

Tatiana2
CORONAS-Photon
Meteor-M N1
2009

Vernov
2014

Meteor-M N2
2014

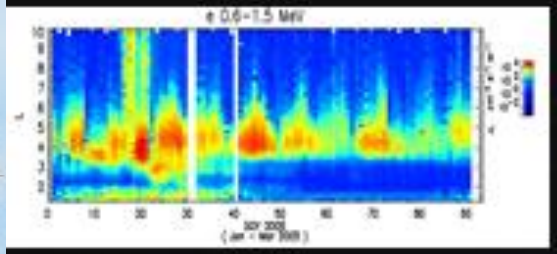
Lomonosov
2016



Solar X- and
gamma flares

Near-Earth
radiation

Outer Earth's
Radiation belt
and SEP



Gamma-ray

Atmospheric transients

Atmospheric emissions

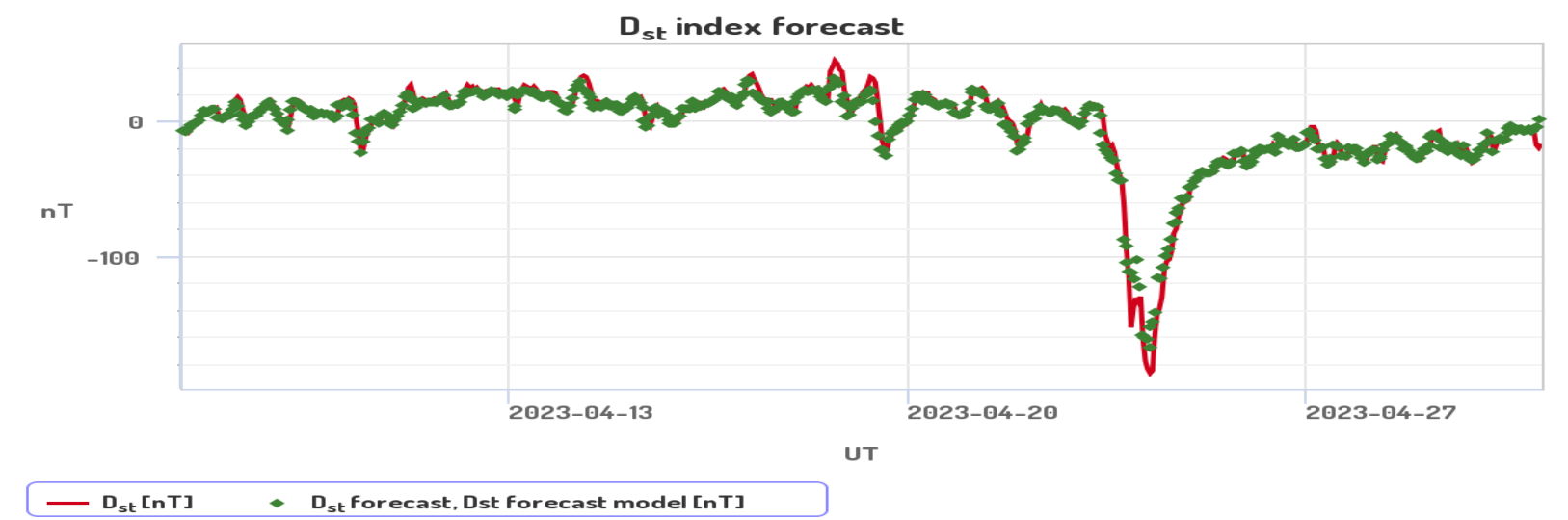
Основные решаемые задачи

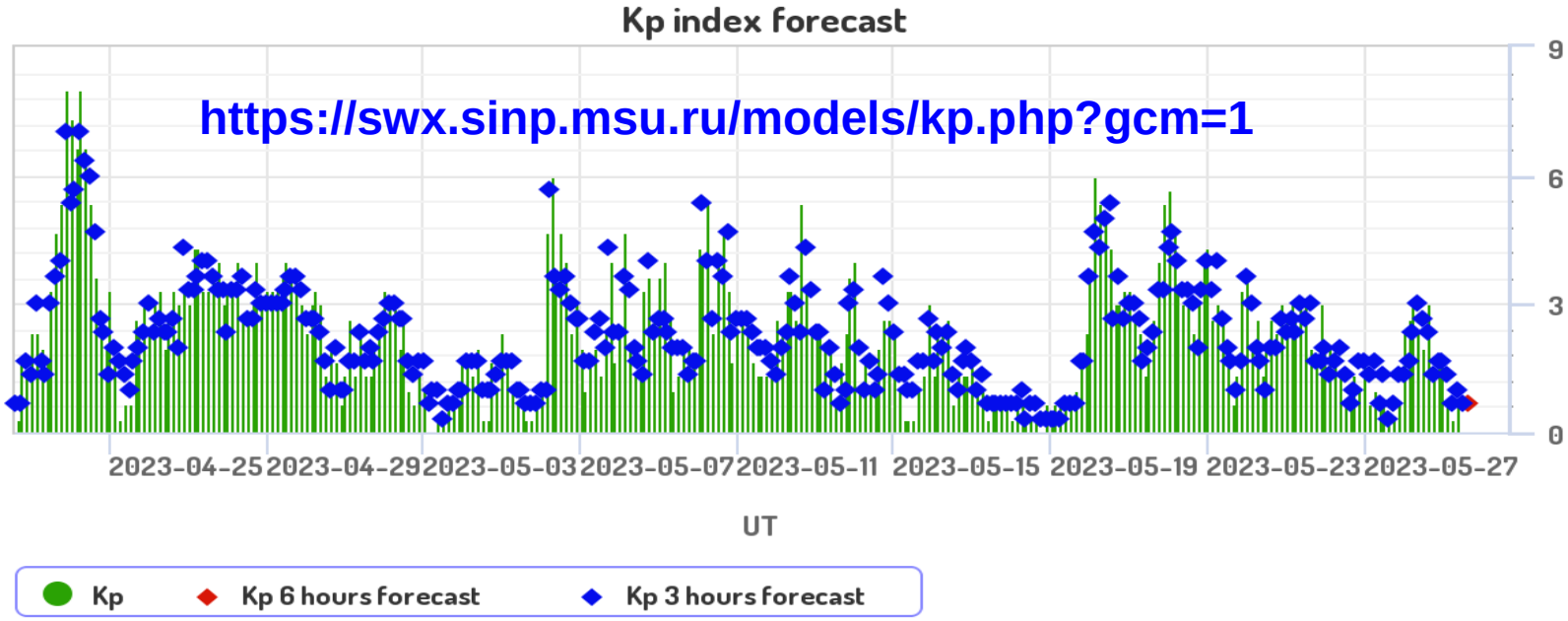
- Прогнозирование:
  - **Часовых значений индекса Dst**
  - **Трёхчасовых значений индекса Kp**
  - **Среднечасовых значений потока релятивистских электронов (РЭ) внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) (E > 2 МэВ) на геостационарной орбите**
  - **Суточных флюенсов РЭ ВРПЗ (E > 2 МэВ) на геостационарной орбите**

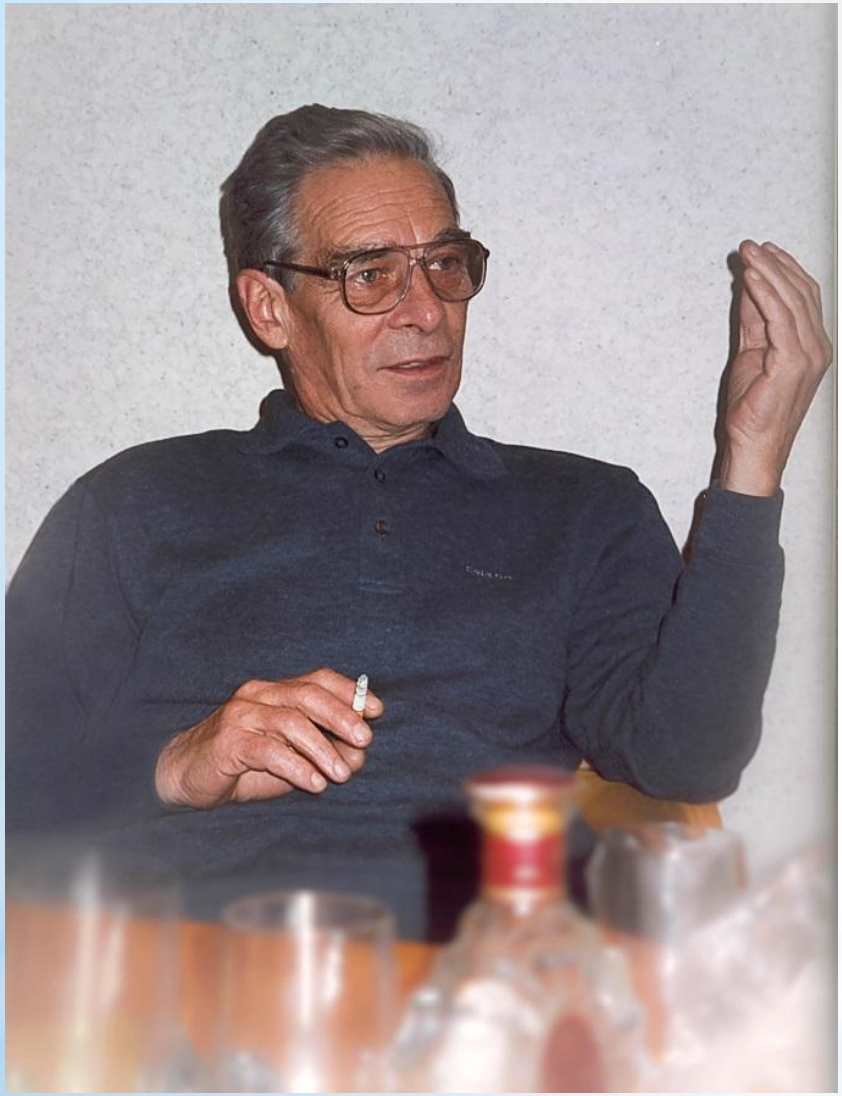
- *Сегментация МВР, описывающих динамику изменения параметров магнитосферы Земли (на основе часовых значений Kp и Dst индексов и среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ (E > 2 МэВ) на геостационарной орбите)*

Пример прогноза Dst и Kp индексов

http://swx.sinp.msu.ru/models/dst.php?gcm=1







Основоположник адаптивных методов в НИИЯФ МГУ -

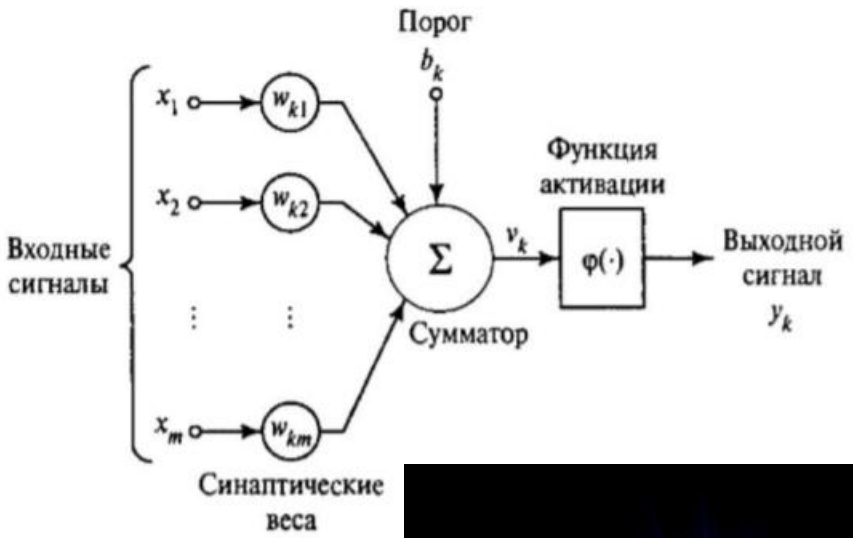
Игорь Георгиевич Персианцев

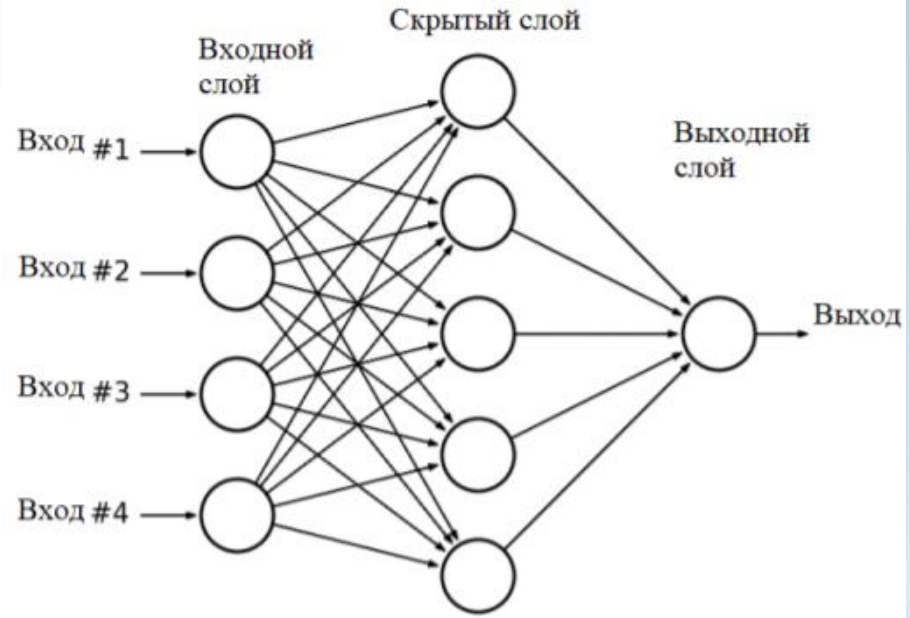
1937 – 2015

Команда swx.sinp.msu.ru
(примерно 2016-2018)

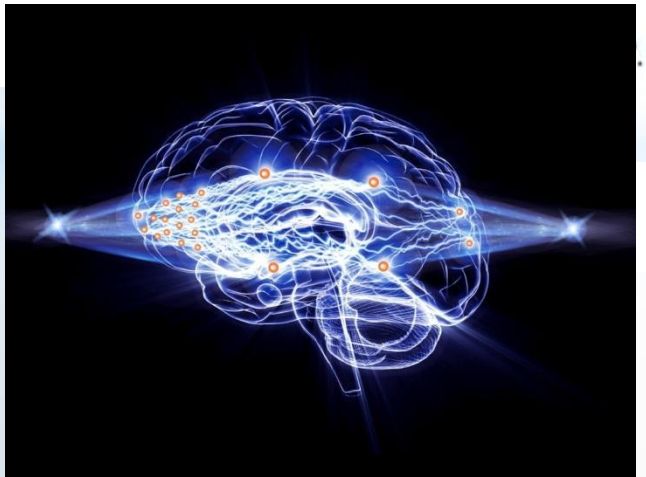
Схемы искусственного нейрона и многослойного персептрона

Искусственный нейрон





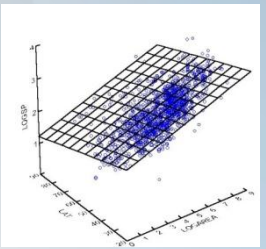
. *Модель персептрона с одним скрытым слоем*

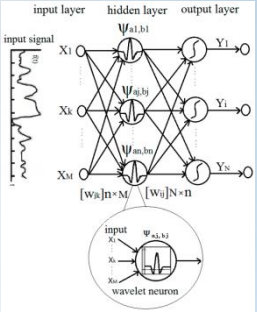


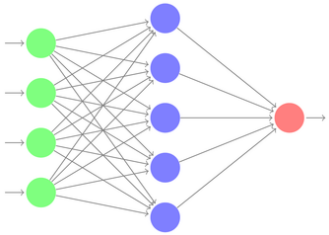
SKOBELTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

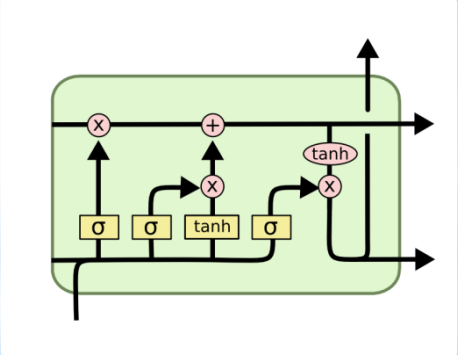
Используемые адаптивные методы прогнозирования

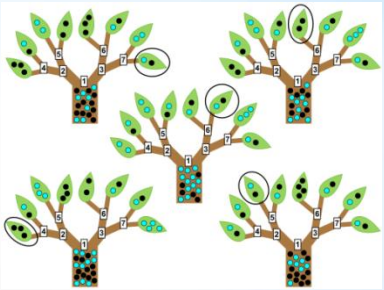
- Линейная регрессия
  - Линейная регрессия в линейном и нелинейном базисе
  - Метод проекций на латентные структуры
- Искусственные нейронные сети без обратных связей
  - Многослойные персептроны
  - Вейвлет нейронные сети
- Рекуррентные нейронные сети
  - Сети с длинной краткосрочной памятью (LSTM)
- Метод группового учёта аргументов (МГУА)
- Адаптивные нейро-нечёткие системы (ANFIS)
- Деревья решений и алгоритмы на их основе
  - Алгоритм случайного леса
  - eXtreme Gradient Boosting
- Комитеты (ансамбли) предикторов











Динамические системы и временные ряды

- Динамическая система (ДС) – изменяющаяся во времени сложная система, описываемая набором параметров (признаков)
- Состояние ДС зависит от её предыстории
- Состояние ДС может зависеть от внешних воздействий
- Поведение ДС описывается многомерным временным рядом (МВР), каждому признаку соответствует компонента временного ряда

A	B	C		Y	<- признаки		
A_{t-n}	B_{t-n}	C_{t-n}		Y_{t-n}	время ->		
…	…	…		…			
A_{t-3}	B_{t-3}	C_{t-3}		Y_{t-3}			
A_{t-2}	B_{t-2}	C_{t-2}		Y_{t-2}			
A_{t-1}	B_{t-1}	C_{t-1}		Y_{t-1}			
A_t	B_t	C_t		Y_t	настоящий момент		
				Y_{t+1}			
				Y_{t+2}			
				…			

Способы обработки данных МВР

- Рекуррентный режим – примеры должны следовать в том же порядке, что и в исходном временном ряде
- Погружение временного ряда

A				B		C				Y					<- признаки
A_{t-n}				B_{t-n}		C_{t-n}				Y_{t-n}				...	время ->
...				...		...				...				Y_{t-3}	
A_{t-3}	...			B_{t-3}	...	C_{t-3}	...			Y_{t-3}				Y_{t-2}	
A_{t-2}	A_{t-3}	...		B_{t-2}	B_{t-3}	C_{t-2}	C_{t-3}	...		Y_{t-2}	Y_{t-3}			Y_{t-1}	
A_{t-1}	A_{t-2}	A_{t-3}	...	B_{t-1}	B_{t-2}	C_{t-1}	C_{t-2}	C_{t-3}		Y_{t-1}	Y_{t-2}	Y_{t-3}		Y_t	
A_t	A_{t-1}	A_{t-2}	A_{t-3}	B_t	B_{t-1}	C_t	C_{t-1}	C_{t-2}		Y_t	Y_{t-1}	Y_{t-2}	Y_{t-3}	Y_{t+1}	настоящий момент
										Y_{t+1}				Y_{t+2}	
										Y_{t+2}					
										...					

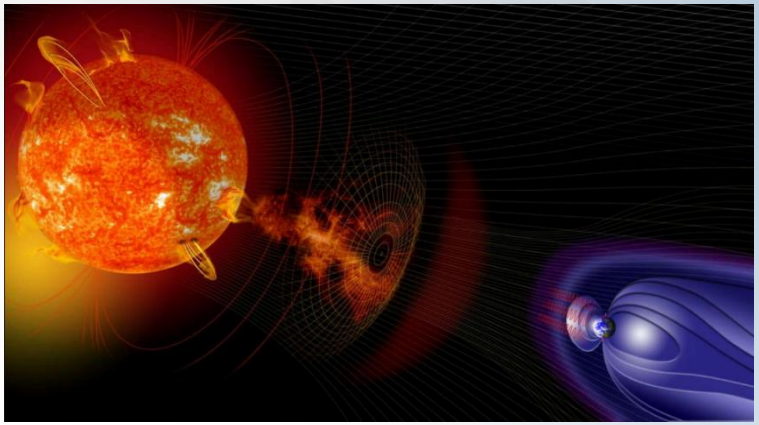
Вопрос о глубине погружения каждой компоненты временного ряда, как правило, требует отдельного исследования.

Итак, мы строим аппроксимацию отображения точки в исходном признаковом пространстве в значение желаемого прогноза:

$$(A_t, A_{t-1},\ldots, A_{t-t_A}, B_t, B_{t-1},\ldots, B_{t-t_B}, C_t, C_{t-1},\ldots, C_{t-t_C}, Y_t, Y_{t-1},\ldots, Y_{t-t_Y}) \rightarrow Y_{t+1}$$

Магнитосфера Земли как динамическая система

Состояние магнитосферы Земли и внешнее воздействие на неё *могут быть описаны* следующими физическими величинами:

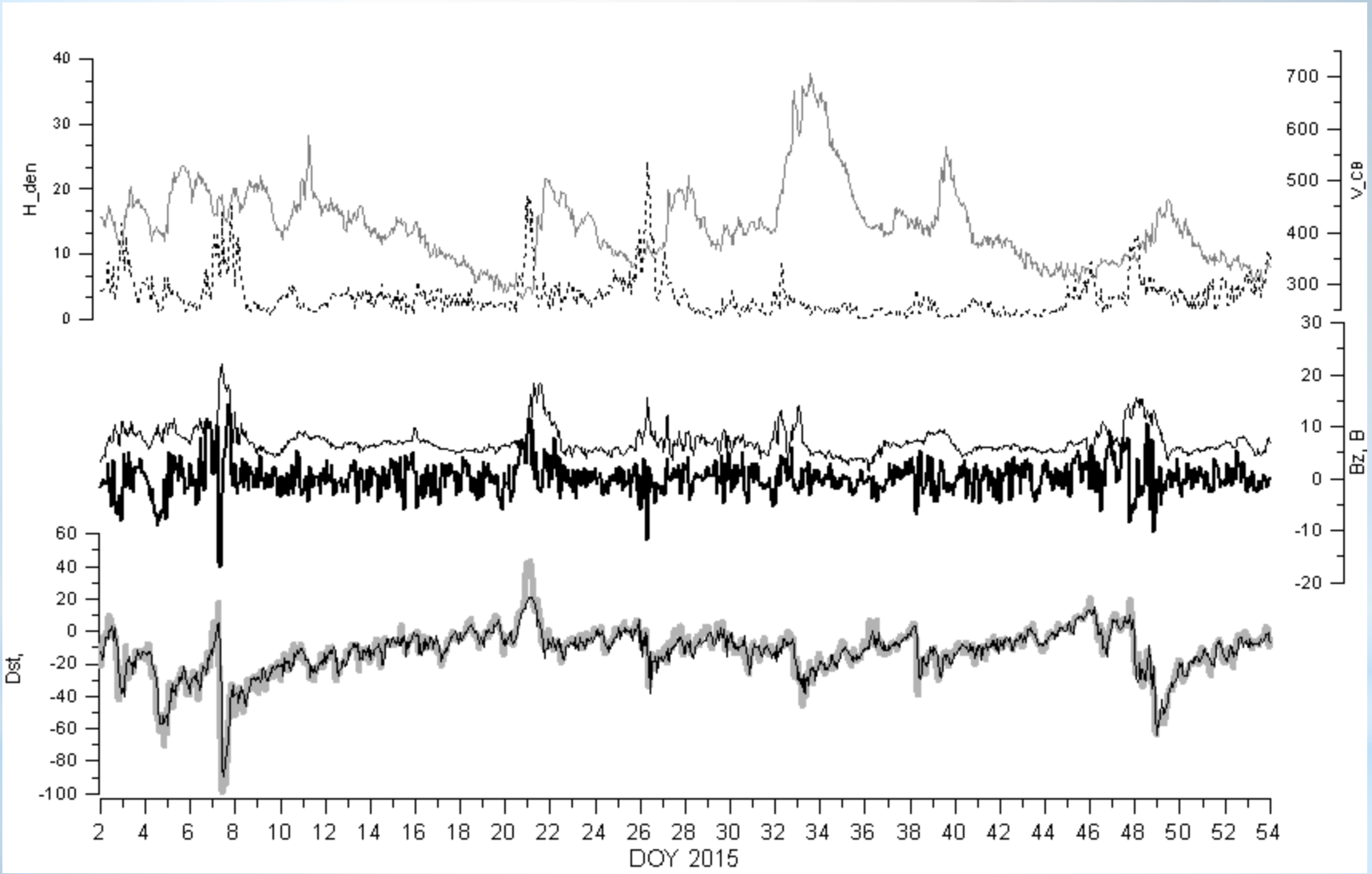


- Геомагнитные индексы: Dst, Kp, Ap, AE
- Параметры солнечного ветра (СВ): скорость V, плотность n_P, температура T
- Параметры межпланетного магнитного поля (ММП): Bx, By, Bz, |B|
- Потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (РЭ ВРПЗ) на геостационарной орбите
- Фазы вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца
- Прогноз скорости СВ по площади корональных дыр на изображениях Солнца
- Информация о наличии коронального выброса массы (КВМ)
- Данные о числе солнечных пятен
- Физически обоснованные комбинации перечисленных параметров
- Индексы УНЧ, вычисляемые на основе перечисленных параметров
- Специальные физически обоснованные функции, эффективно описывающие передачу энергии от СВ в магнитосферу (coupling functions)

Входные параметры и источники данных

- Геомагнитные индексы:
  - World Data Center, Kyoto, Japan
- Параметры солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем:
  - Данные космического аппарата ACE, приборы SWEPAM и MAG
- Потоки РЭ ВРПЗ на геостационарной орбите:
  - Данные проекта GOES
- Изображения Солнца для расчёта площадей корональных дыр:
  - Данные проекта SDO, прибор AIA
- Значения индексов ультранизких частот (УНЧ) (ULF)
  - Институт Физики Земли (ИФЗ РАН)
- Число солнечных пятен
  - Royal Observatory of Belgium, Brussels

Прогноз часовых значений индекса Dst

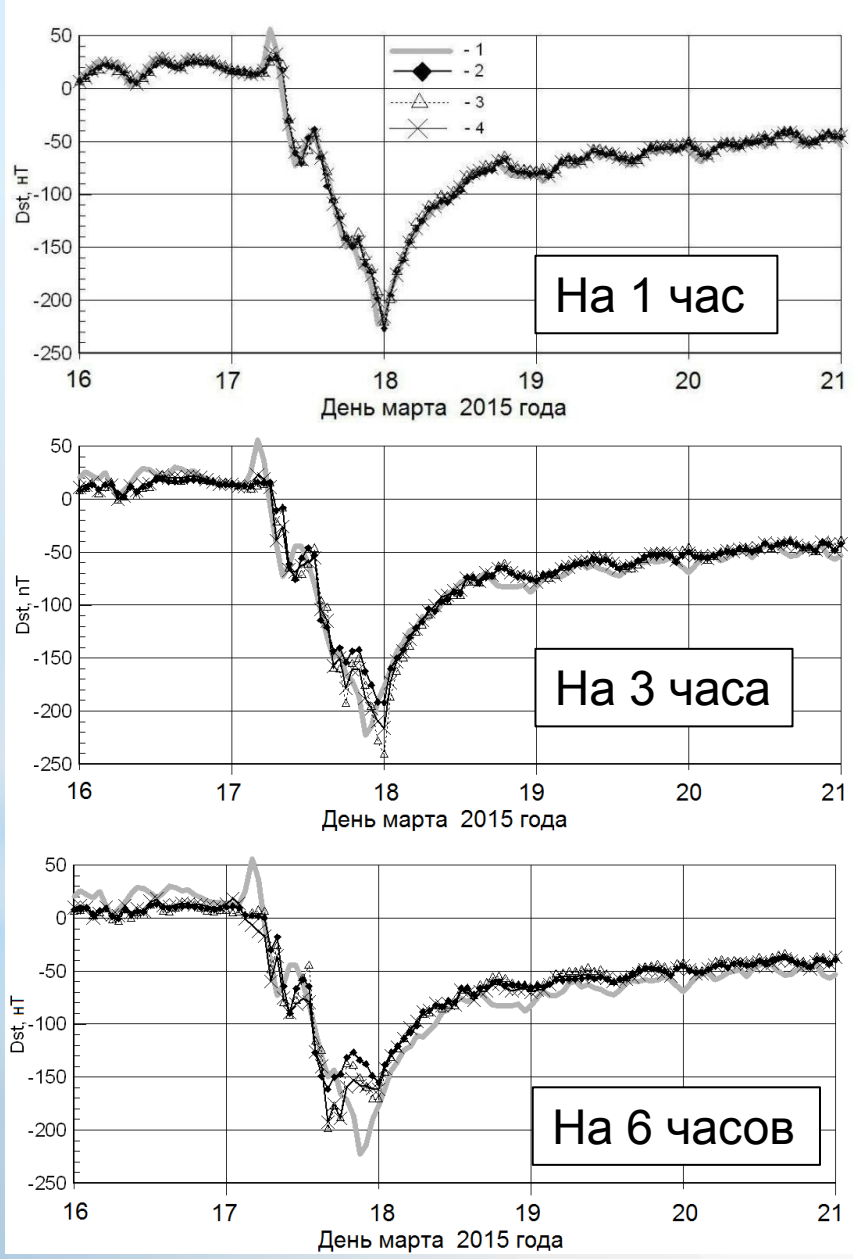


ВР часовых значений индекса Dst и его прогноз на 3 часа вперёд (внизу). Основные входные параметры для прогноза (вверху).

Отбор и преобразование входных признаков

- Погружение временного ряда приводит к резкому увеличению числа входных признаков (число физических признаков × глубину погружения)
- Это усложняет работу алгоритмов и увеличивает возможность т.н. переучивания (падения качества работы на независимых данных)
- Требуется увеличение количества примеров или понижение входной размерности данных
- Количество примеров ограничено доступными массивами данных
- Понижение входной размерности может быть достигнуто путем отбора существенных признаков или преобразования признаков
- Адаптивные методы отбора признаков (плюс – интерпретируемость!):
  - Определение глубины погружения признака по автокорреляции
  - Отбор существенных признаков по кросс-корреляции
  - Нелинейные адаптивные методы отбора (в осн. нейросетевые)
  - Часто методы отбора требуют задания порога отбора

Прогноз часовых значений индекса Dst



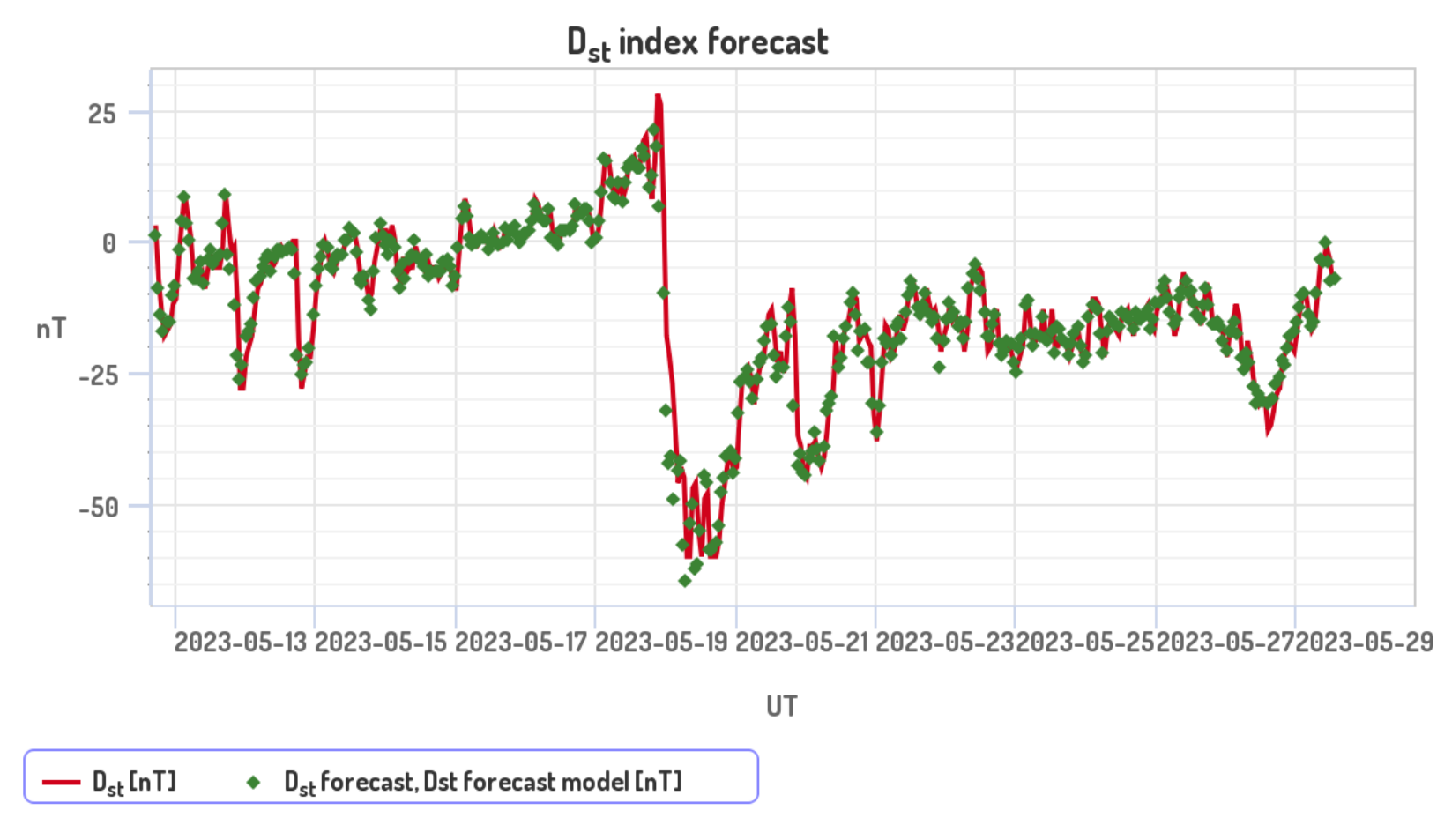
1 – измеренные значения *Dst* индекса

2 – прогноз при помощи среднего по 12 сетям

3 – прогноз при помощи гетерогенного комитета из 12 сетей

4 – прогноз при помощи среднего из 3 рекуррентных сетей с одинаковыми параметрами (*LSTM* с 96 блоками).

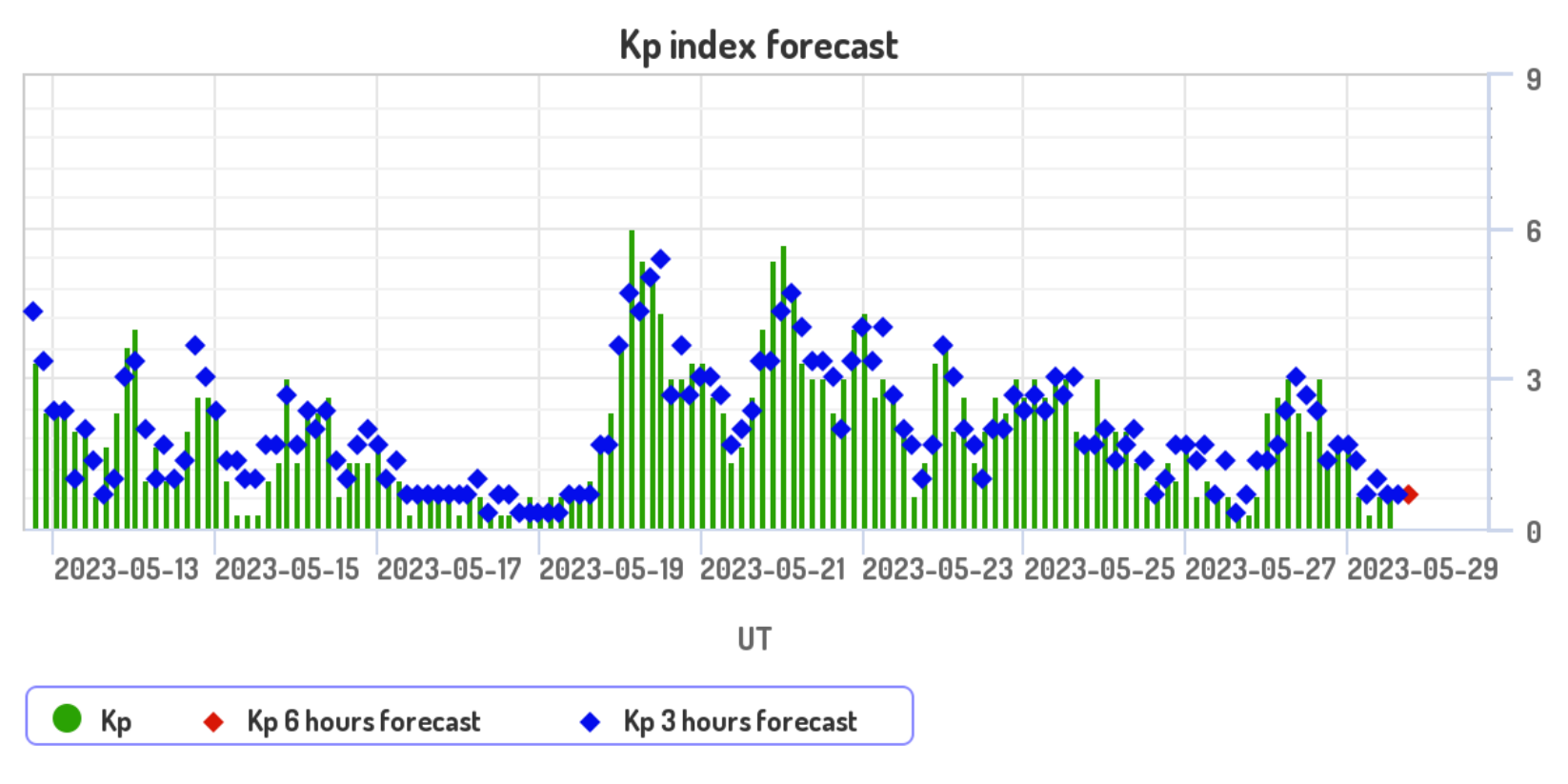
Прогноз значений индекса Dst



Онлайн прогноз Dst на один час вперед на сайте ЦОКМ НИИЯФ МГУ

http://swx.sinp.msu.ru/models/dst.php?gcm=1

Прогноз значений Кр-индекса



Онлайн прогноз Dst на один час вперед на сайте ЦОКМ НИИЯФ МГУ

http://swx.sinp.msu.ru/models/kp.php?gcm=1

Прогноз среднесуточных значений Кр-индекса

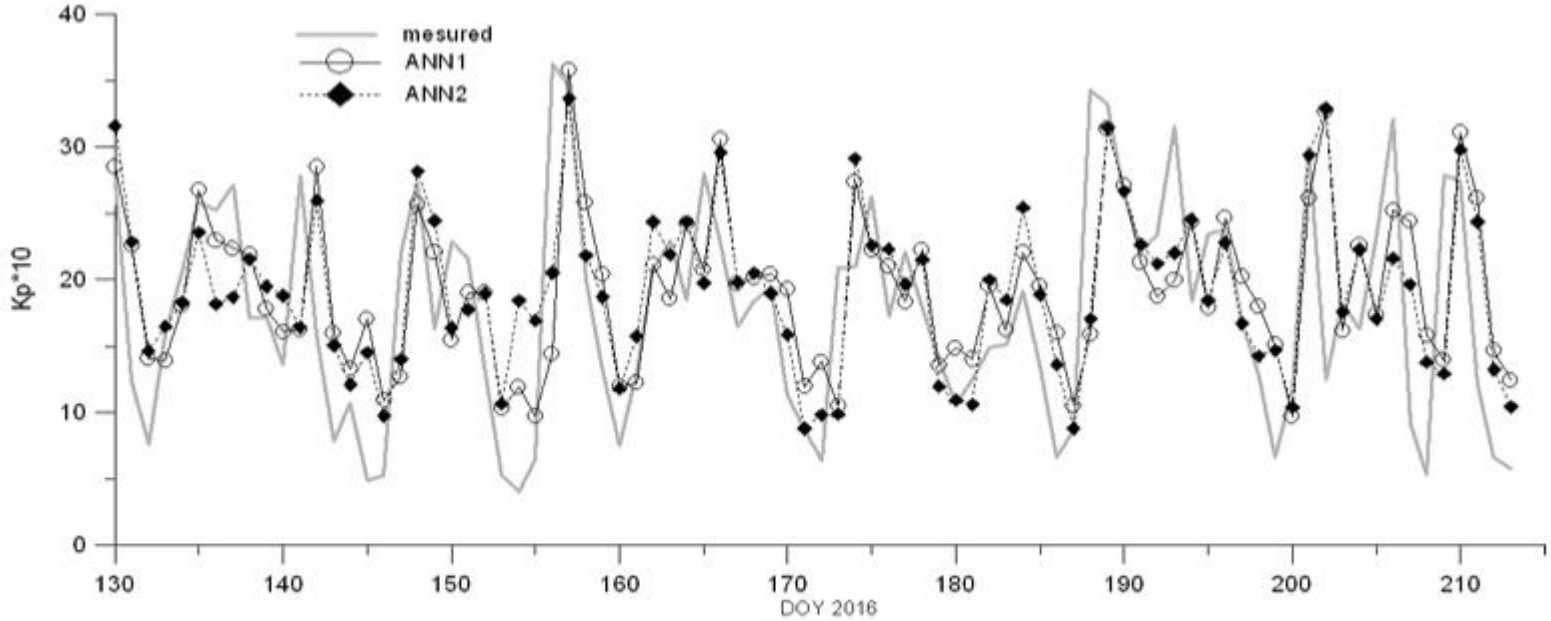
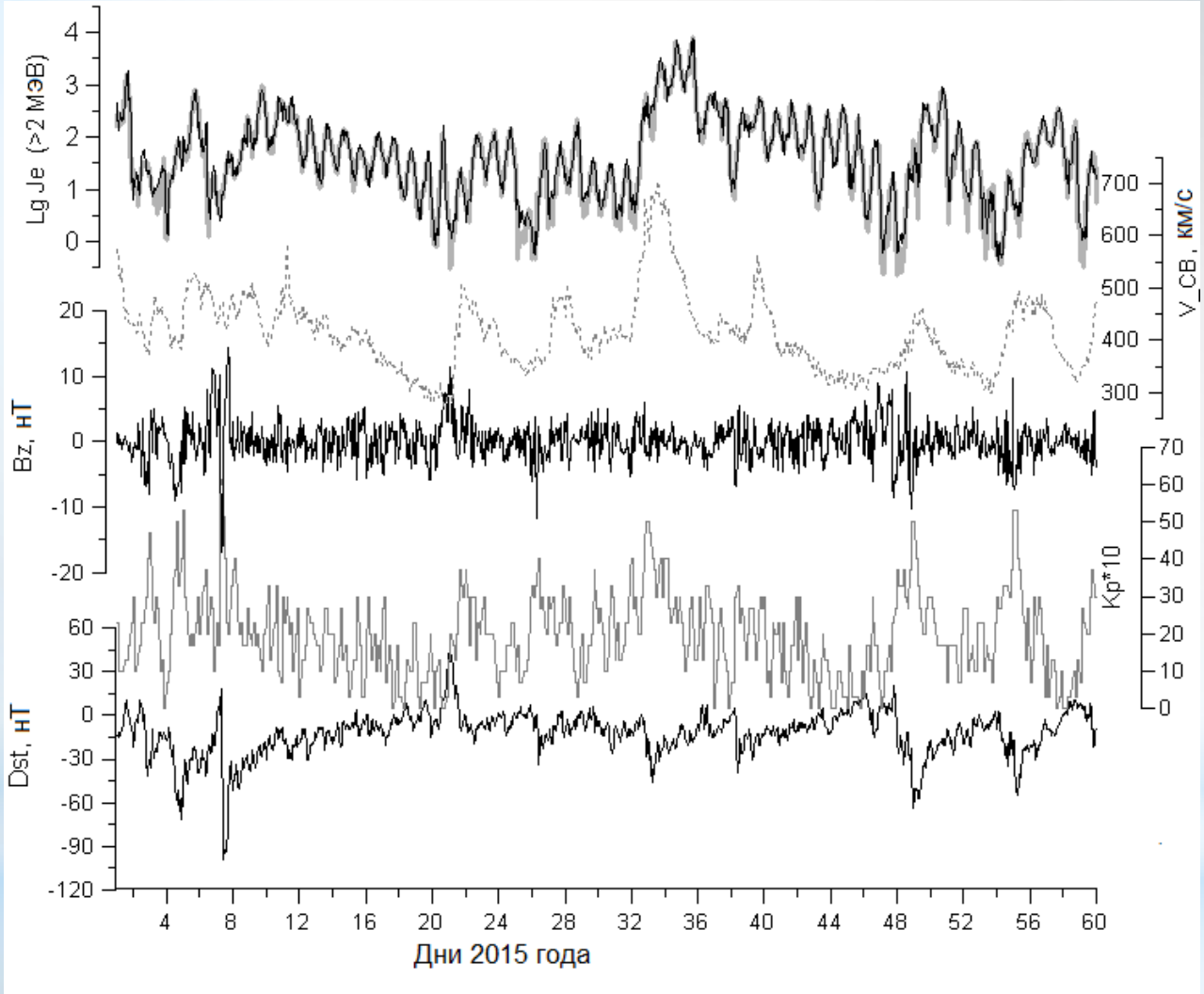


Fig. 4. An example of the predictions of the time series of daily average Kp-index one day ahead from May 9 to July 31, 2016 and their comparison with the measured values.

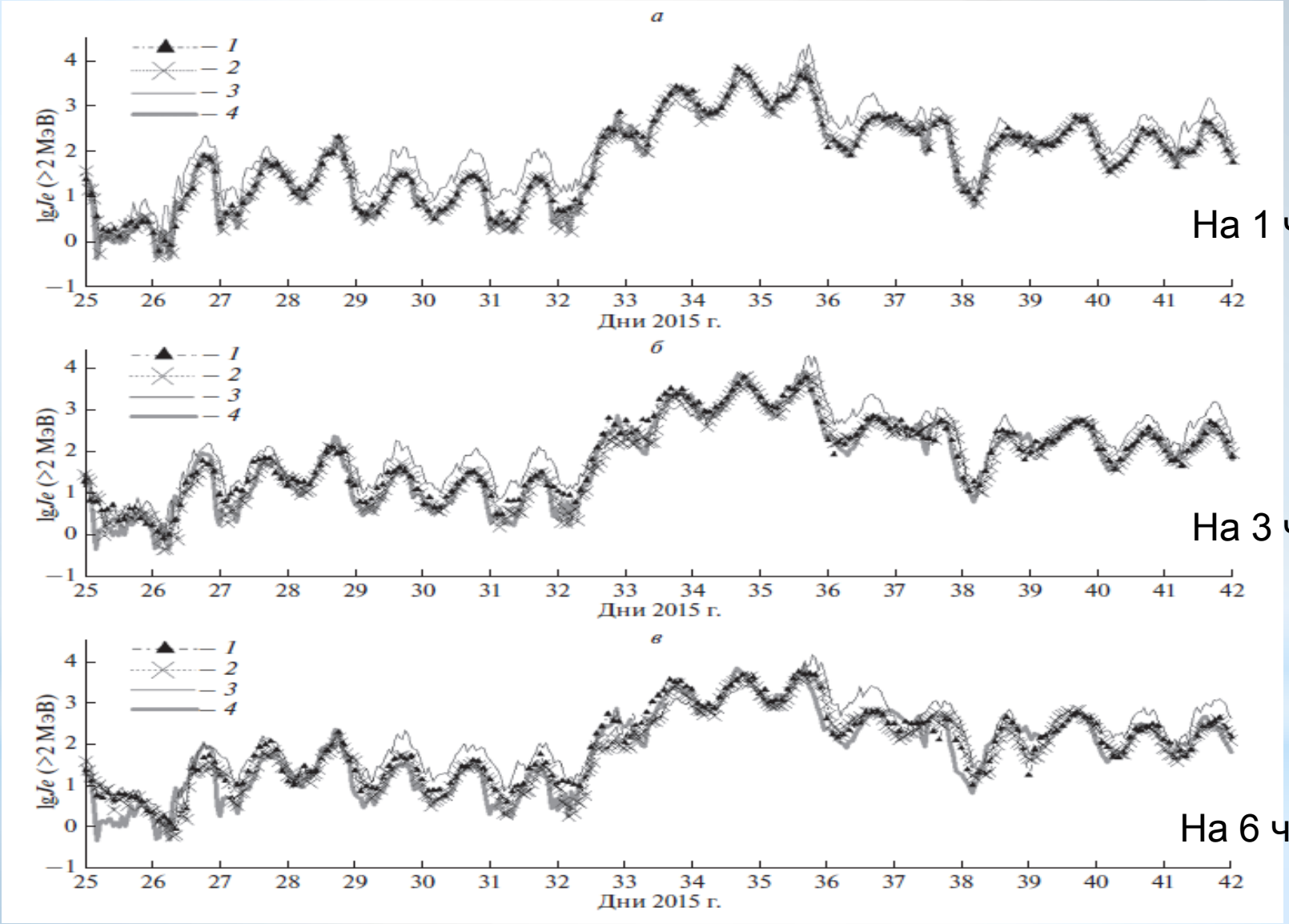
I. Myagkova, V. Shiroky, and S. Dolenko. Prediction of geomagnetic indexes with the help of artificial neural networks. *E3S Web of Conferences*, 20:art. 02011, 2017.

Прогноз среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ



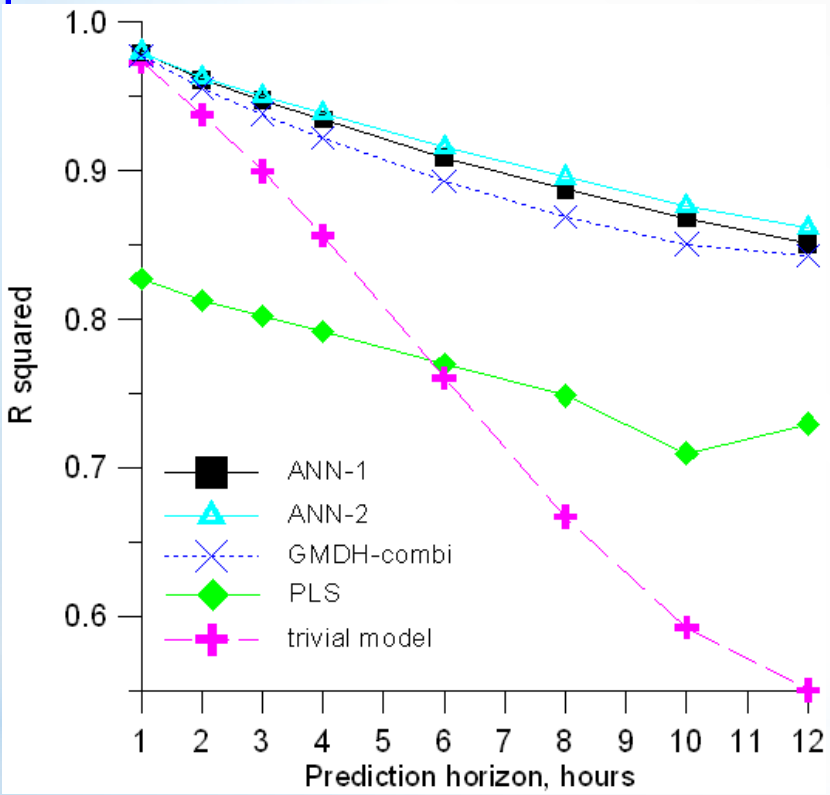
ВР часовых значений потока РЭ ВРПЗ и его прогноз на 3 часа вперёд (вверху). Основные входные параметры для прогноза (внизу).

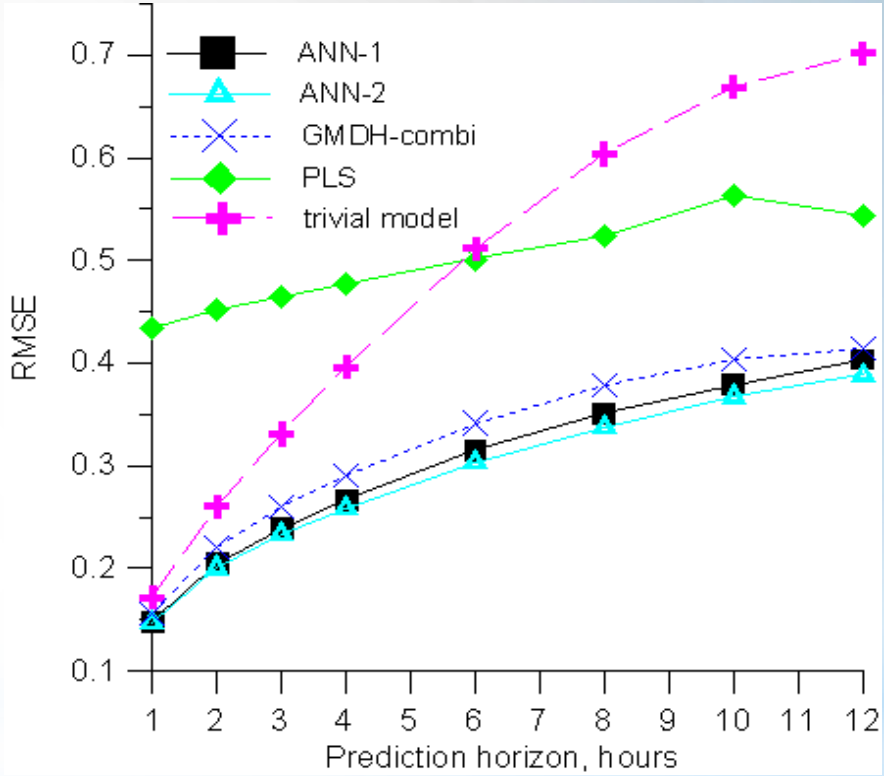
Прогноз среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ



1 – ИНС, 2 – МГУА, 3 – ПЛС, 4 – прогнозируемый временной ряд

Прогноз среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ





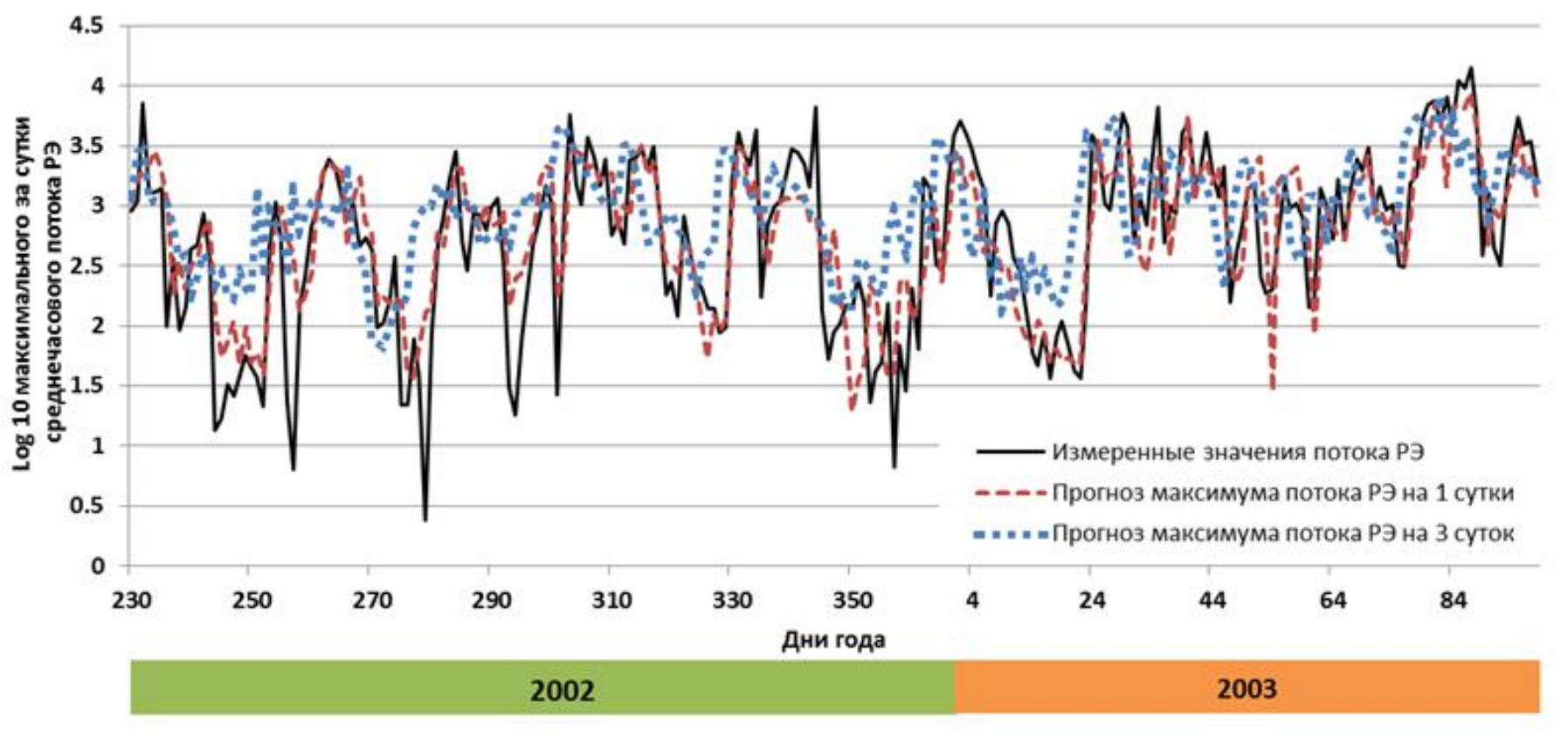
1 – ИНС, 2 – МГУА, 3 – ПЛС, 4 – тривиальная модель

Наилучший результат показала ИНС (персептрон)

Модель краткосрочного прогнозирования потока электронов (> 2 МэВ) в реальном времени на геостационарной орбите на основе искусственных нейронных сетей

Спутник GOES-13 в течение июня 2014 года и сентября 2014 года.

Прогноз максимальных за сутки среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ



Пример сравнения результатов прогнозирования временного ряда десятичного логарифма потоков РЭ ВРПЗ (> 2 МэВ) (в $(см^2 \cdot с \cdot ср)^{-1}$) методом комитета деревьев решений
на сутки (красная линия) и на трое суток вперед (синяя линия)
с результатами наблюдений (черная линия)
с 25 августа 2002 по 8 апреля 2003 года.

Прогноз максимальных за сутки среднечасовых потоков РЭ ВРПЗ

Коэффициент корреляции между предсказанными и реальными данными за 2002-2003 гг. для моделей, построенных на усредненных суточных данных с погружением на одни сутки

Горизонт прогноза	Результаты [1] за 2002 г.	АРМ	ИНС	КДР
1 сутки	0.76	0.61	0.62	0.60
3 суток	0.46	0.44	0.42	0.51

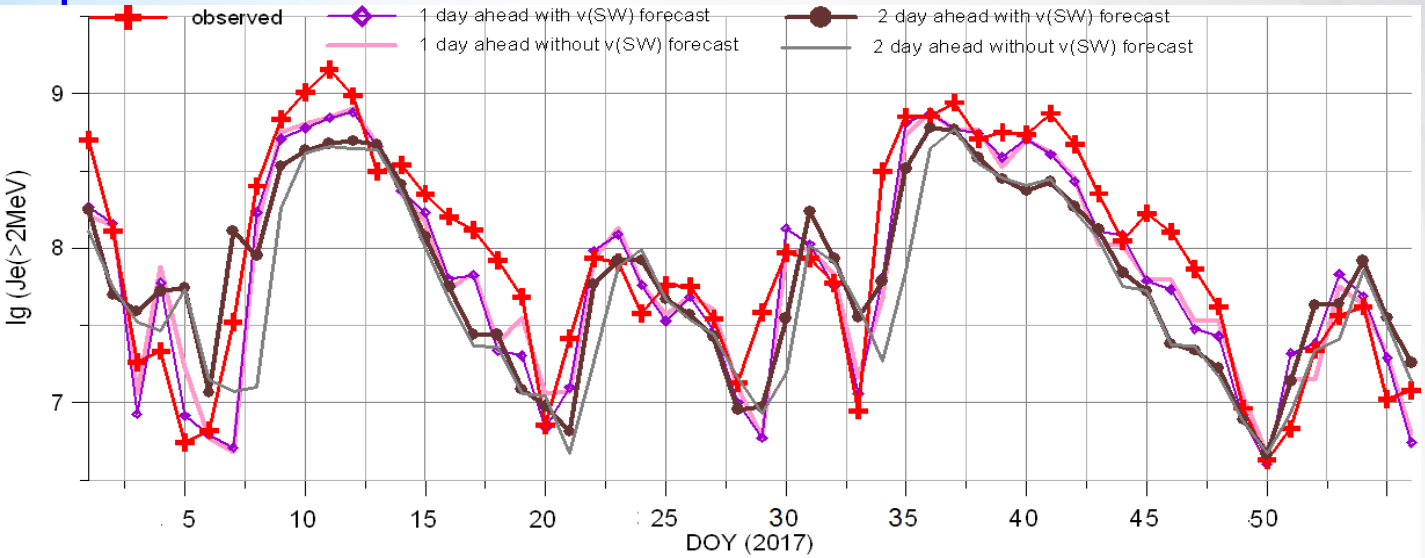
Коэффициент корреляции между предсказанными и реальными данными на тестовом наборе за 2002-2003 гг. для моделей, построенных на среднечасовых данных с погружением, выбранным на основе расчета спада функции автокорреляции.

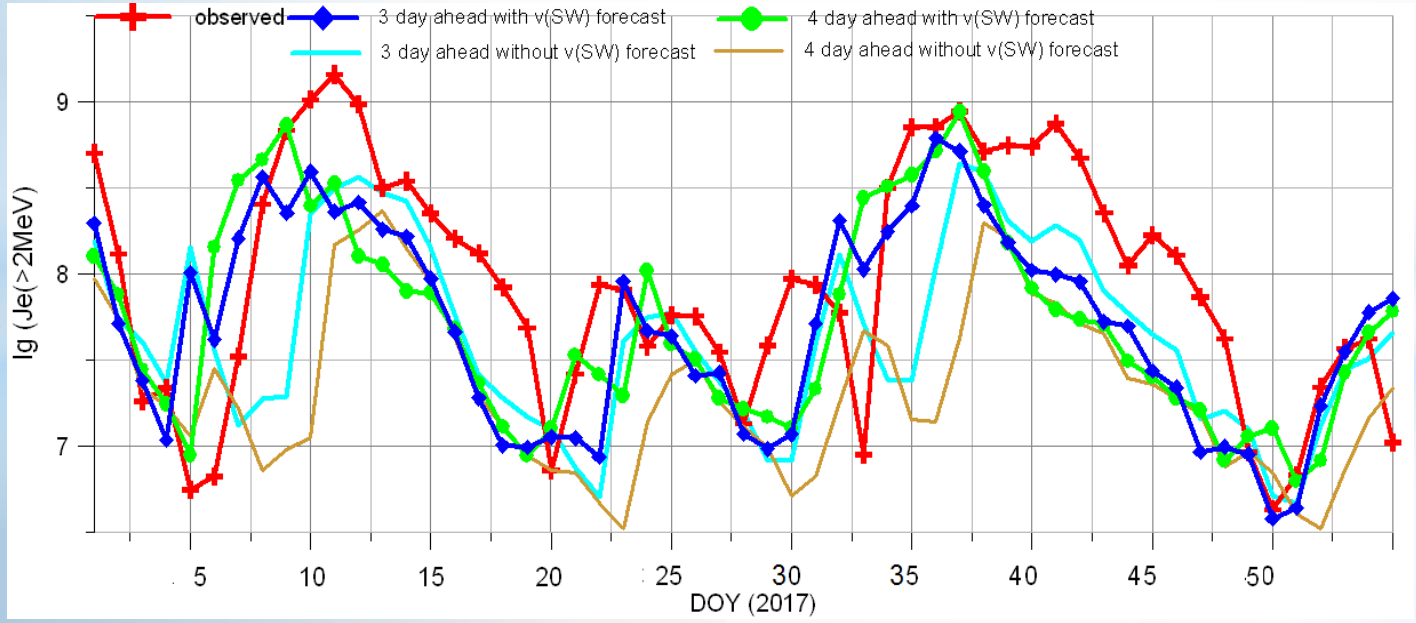
Горизонт прогноза	Результаты [1] за 2002 г.	АРМ	ИНС	КДР
1 сутки	0.76	0.70	0.71	0.76
3 суток	0.46	0.34	0.36	0.47

АРМ – многомерная авторегрессионная модель, ИНС – многослойный персептрон, КДР – комитет деревьев решений в рамках bagging-подхода.

[1] Simms et al. JGR Space Physics, 121, 3181-3197 (2016) – АРМ с УНЧ и ОНЧ

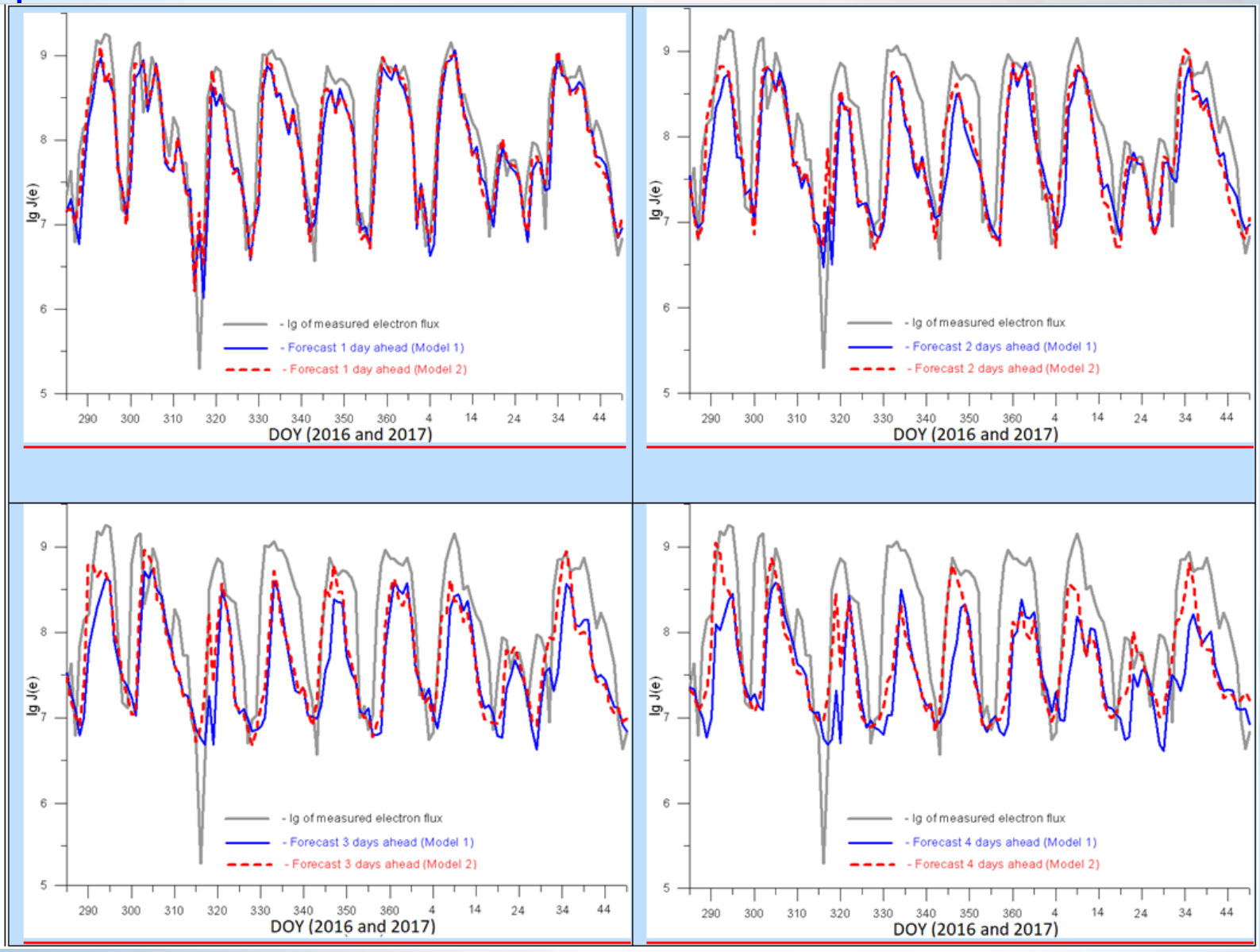
Прогноз суточных флюенсов РЭ ВРПЗ



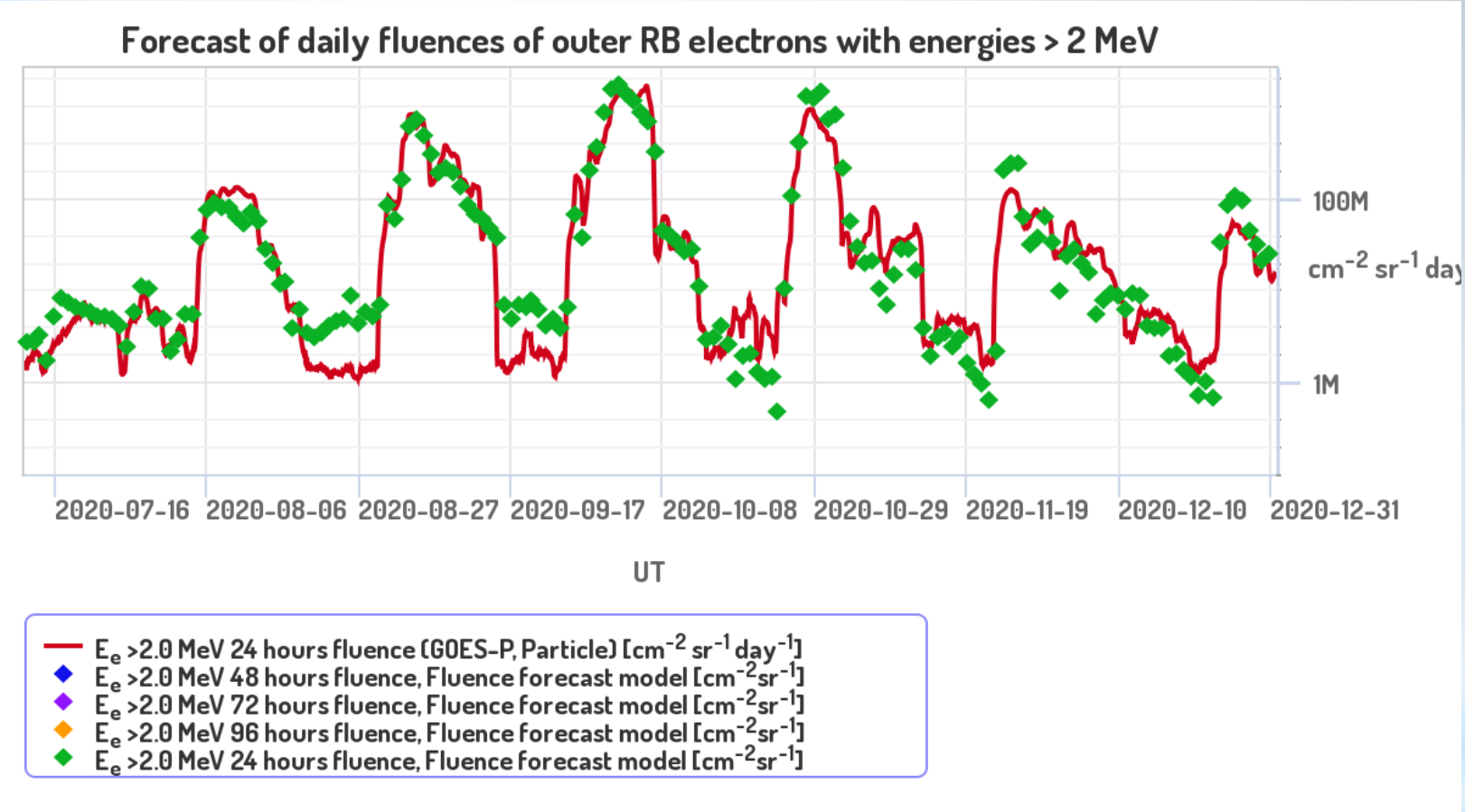


Сравнение качества прогнозов суточных флюенсов РЭ ВРПЗ, сделанных без учёта и с учётом прогноза скорости СВ по площадям корональных дыр на изображениях Солнца

Прогноз суточных флюенсов РЭ ВРПЗ



Прогноз суточных флюенсов РЭ ВРПЗ



Онлайн прогноз суточных флюенсов РЭ ВРПЗ на одни сутки вперед

на сайте ЦОКМ НИИЯФ МГУ

http://swx.sinp.msu.ru/models/rb_electrons/index.php?gcm=1

Направления дальнейшей работы

- Прогнозы на сайте **swx.sinp.msu.ru**
  - Обеспечение доступности на сайте **swx.sinp.msu.ru** прогнозов с бОльшими горизонтами:
    часовых – до 3-6 часов, суточных – до 3 суток
  - Расширение номенклатуры прогнозов

- Научная часть работ
  - Дальнейшее использование физически осмысленных агрегатов базовых физических признаков (в т.ч. coupling functions)
  - Разработка и применение методов классификации событий
  - Использование нелинейных адаптивных методов отбора и преобразования признаков
  - Исследование возможностей учёта КВМ
  - Использование индексов УНЧ
  - Оптимизация и использование современных адаптивных методов

Спасибо за внимание!