

Прогнозирование состояния внешнего радиационного пояса Земли при помощи адаптивных методов на базе Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ

Мягкова И.Н., Калегает В.В., Ефиторов А.О., Широкий В.Р., Доленко С.А.

НИИЯФ МГУ, Москва, Россия; irina@srd.sinp.msu.ru

A photograph of an Arctic landscape. In the foreground, there is a flat, sandy or snowy ground. In the middle ground, there is a small red building with a dark roof. To the left of the building, there is a small, dark, rectangular structure. In the background, there are snow-covered mountains under a cloudy sky. The text is overlaid on the image.

Вторая всероссийская научная конференция
«Гелиогеофизические исследования в Арктике»
24 – 28 сентября 2018, г. Мурманск

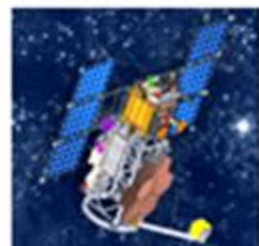
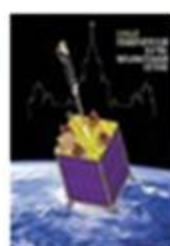
План доклада

- Цель работы
- Центр Космической Погоды НИИЯФ МГУ
- Примеры прогноза потоков электронов внешнего РПЗ на сайте ЦКП НИИЯФ МГУ
- Входные данные, архитектура ИНС
- Исследование возможного горизонта прогноза
- Исследование результатов работы разных моделей
- Заключение



Абстракт

Прогнозирование радиационных условий в ОКП, и в том числе, состояния внешнего радиационного пояса Земли, является важным как с прикладной точки зрения освоения Арктики, так и как часть комплексного изучения физических явлений в ближнем космосе. В частности, одну из наиболее серьезных технических проблем представляют собой резкие возрастания потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ, приводящие к единичным сбоям в электронных микросхемах на борту КА. Актуальность данной проблемы связана еще и с тем, что космические аппараты с низкими круговыми орбитами пересекают ВРПЗ на широтах, близких к авроральным. Так как вариации потоков электронов на малых высотах запаздывают по сравнению с вариациями на геостационарной орбите, первоочередной задачей является прогноз потоков РЕ на геостационарной орбите



CORONAS-F
2001

Tatiana1
2005

Tatiana2
CORONAS-Photon

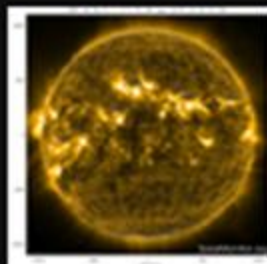
Vernoy
2014

Meteor-M N2
2014

Lomonosov
2016

Meteor-M N1
2009

Outer Earth's
Radiation belt
and SEP



Solar X- and
gamma flares

Gamma-ray

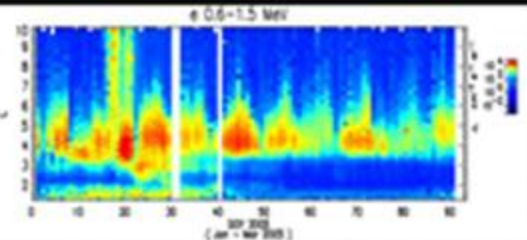


Near-Earth
radiation

Atmospheric transients



Atmospheric emissions



Radiation monitoring

Data:

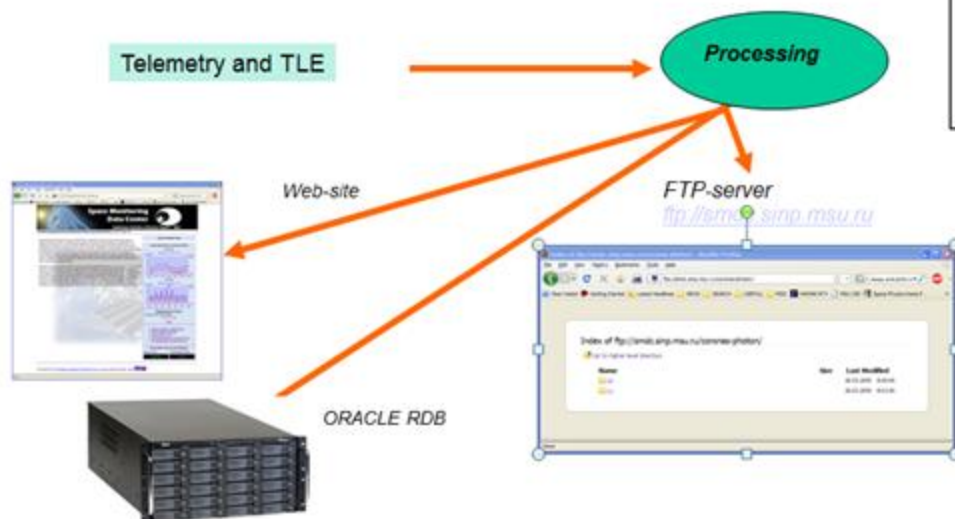
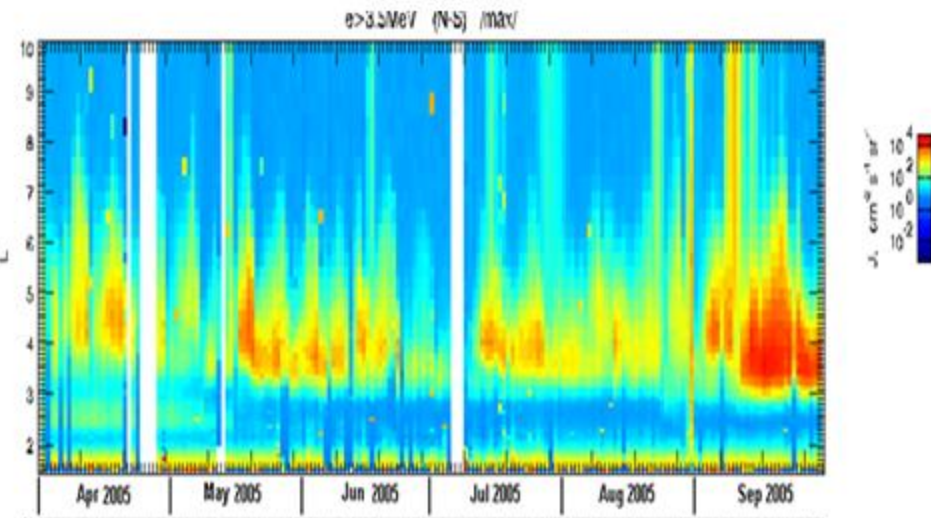
- Data from own sources, from worldwide
- Data availability, real-time processing, *Free access*
- Data postprocessing
- Software: *standard (DB, graphics) and unique*

Models

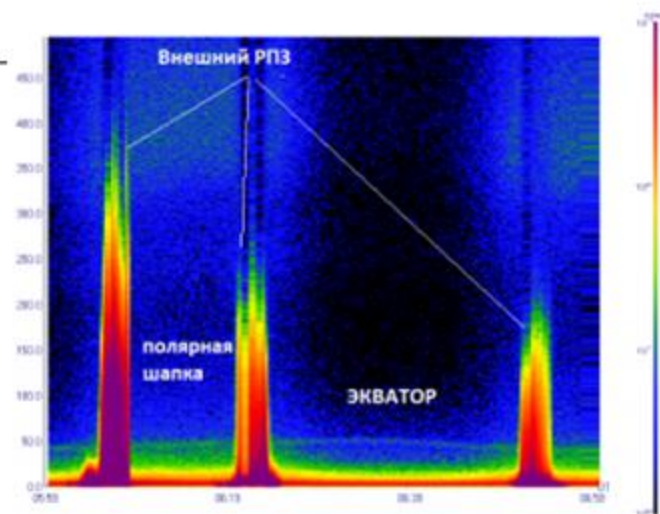
- Interactive
- Real-time, *DB connection*

Visualization

- Fast app (Ajax), DB connection, 3D



Real-time data processing



Космическая погода



НИИЯФ МГУ

ГЛАВНАЯ

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

АНАЛИЗ

3D МАГНИТОСФЕРА

ПРИЛОЖЕНИЯ

ДАННЫЕ

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 (22 сентября 2018, 10:55 UT)

[Геомагнитные условия и плазма](#)

[Радиационные условия](#)

Солнце

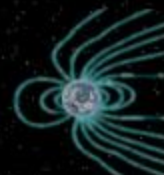


Относительная
площадь
корональных дыр
4.28%



Гелиосфера

$V_{SW} = 407$ км/с
 $n_{SW} = 0.20$ см⁻³
IMF $B_z = 1.8$ нТл
Прогноз на сутки
 $V_{SW} = 300$ км/с



Магнитосфера

Текущие значения
 $V_{SW} = 408$ км/с
 $P_{SW} = 0.03$ нПа
 $R_{SS} = 19.1 R_E$
 $Dst = 6$ нТл

Прогноз на час:
 $V_{SW} = 399$ км/с
 $P_{SW} = 0.05$ нПа
 $R_{SS} = 18.0 R_E$
 $Dst = 7$ нТл

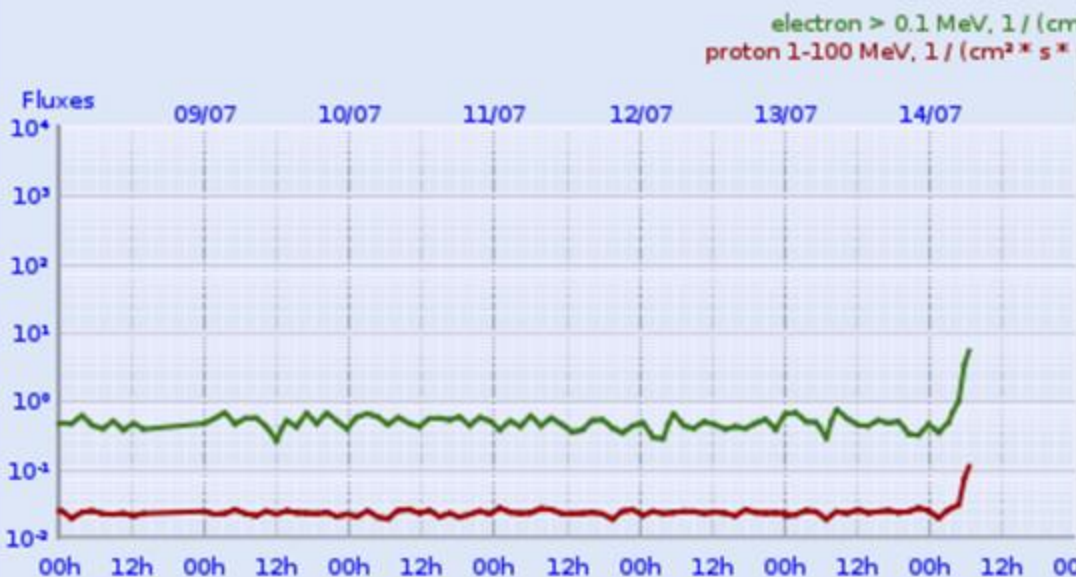
* Цветовые обозначения: понижение, фон, повышение, событие

<http://smdc.sinp.msu.ru/>



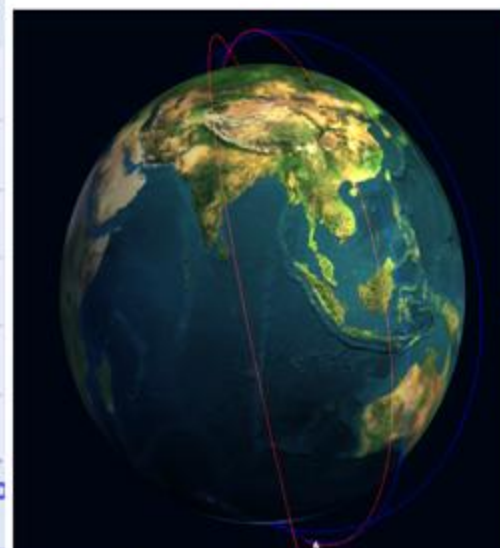
[Home](#) [Data](#) [Services](#) [Models](#) [Projects](#) [Links](#)

Meteor-M #1 skl, up to 2017, Jul, 14 (North polar region averaged fluxes)



Time: 2017-07-14 11:00:32 UTC

Real-time: Meteor-m1 and Meteor-m2 trajectories



Meteor-m1
Time (UTC):
2017-07-14 11:05:03
Location (GEO):
x = -1689.74 km
y = 1045.3 km
z = -6926.61 km
Location (Geodetic):
lat = -74.08 deg
lon = 148.26 deg
alt = 847.58 km

Meteor-m2
Time (UTC):
2017-07-14 11:05:03
Location (GEO):
x = 4647.25 km
y = -3354.89 km
z = -4370.48 km
Location (Geodetic):
lat = -37.49 deg

Текущие условия в околоземном космическом пространстве (22 сентября 2018, 10:59 UT)

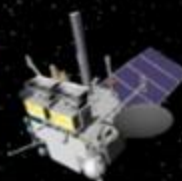
[Геомагнитные условия и плазма](#)

[Радиационные условия](#)

Солнечная активность



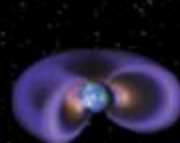
Максимальный класс
вспышки сегодня = **C2.1**
За прошедшие сутки:
Число Вольфа = 41
Число вспышек X+M = 0



Протоны СКЛ

$J(p > 10 \text{ МэВ}) = 0.17$
 $J(p > 100 \text{ МэВ}) = 0.04$
 $J(p \text{ } 13.5\text{--}23 \text{ МэВ}) = 2.06$
Единицы: $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер})$

Релятивистские электроны ВРПЗ



$J(e > 2 \text{ МэВ}) = 6.76 \times 10^{-2}$
 $J(e > 0.6 \text{ МэВ}) = 2.51 \times 10^4$
Прогноз на час:
 $J(e > 2 \text{ МэВ}) = 17214.74$
Единицы: $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер})$

* Цветовые обозначения: *понижение*, *фон*, *повышение*, *событие*

[Солнце](#)

[Магнитосфера](#)

[Комментарий специалиста](#)

[Спутники на орбите](#)

[Данные](#)

[Модели](#)

Центр анализа космической погоды НИИЯФ МГУ, на сайте которого осуществляется прогноз среднечасовых потоков электронов <http://swx.sinp.msu.ru/models/forecast.php> и суточных флюенсов - http://swx.sinp.msu.ru/models/rb_electrons/index.php предоставляет информацию о текущем состоянии ОКП. Информационные сервисы Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ на Интернет-сайте центра - <http://swx.sinp.msu.ru> - обеспечивают доступ к актуальным данным, 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.

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

<http://swx.sinp.msu.ru/models/forecast.php>

Пример результатов этой модели показан на рисунке - зеленые точки прогноза, красная кривая - экспериментальные данные спутника GOES-13 в течение июня 2014 года и сентября 2014 года.

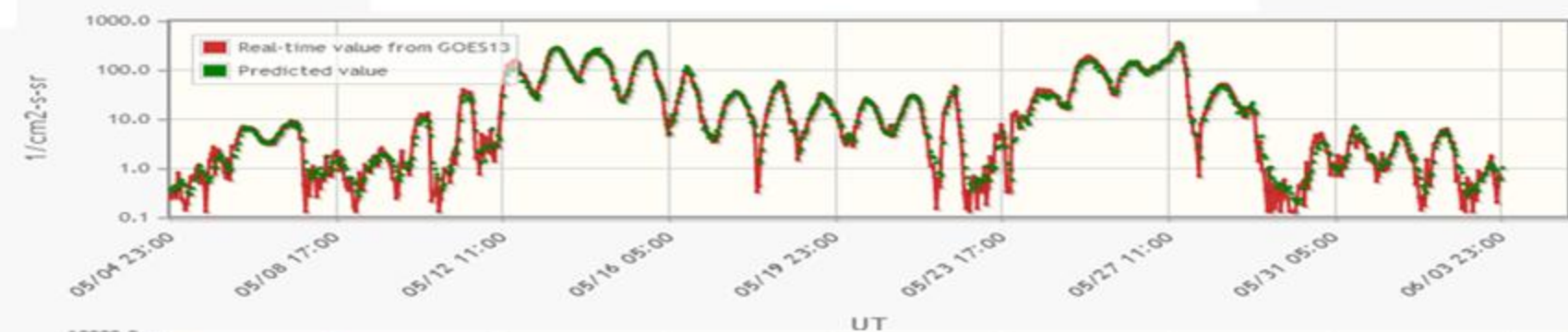
						Electron flux	
						Now	Forecast
< 10	10 - 50	50 - 500	500 - 1000	1000 - 10000	> 10000	0.72	1

Days

- 1
- 3
- 7
- 30
- 90

сутки

- 1
- 3
- 7
- 30
- 90



[Текущее состояние ОКП](#)
[Гелиосфера](#)
[Магнитосфера](#)
[Радиационные условия](#)

Краткосрочный прогноз среднечасовых потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите

≤ 10 10 - 50 50 - 500 500 - 1000 1000 - 10000 > 10000	Потоки РЭ ВРПЗ	
	Текущее	Прогноз
Значение	0.17	1
Потоки РЭ ВРПЗ	Экстремально низкие	Экстремально низкие

Диапазон, сутки

- 1
- 3
- 7
- 30
- 90



Входные данные

1) Параметры солнечного ветра в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем:

скорость СВ v , плотность СВ N_p , температура СВ T_{tr} (ACE, SWEPAM);

2) Параметры межпланетного магнитного поля (ММП) в системе GSM: модуль вектора поля B , B_x , B_y , B_z (MAG);

3) Геомагнитные индексы Dst и K_p (МЦД - Киото).

4) Логарифм потока релятивистских электронов (> 2 МэВ).

Измеряется на геостационарной орбите спутниками серии GOES

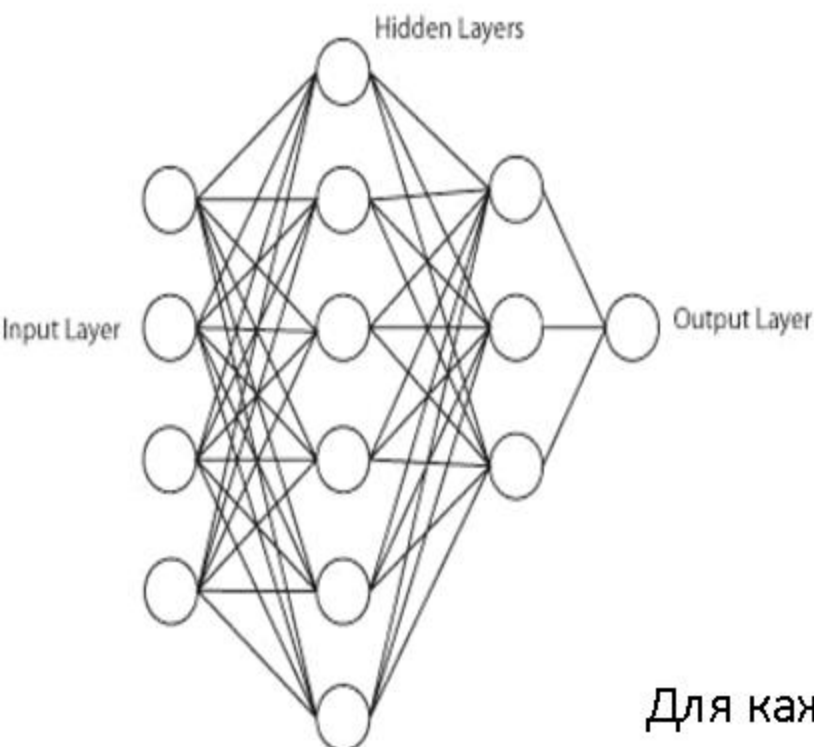
Период данных - с 1998 по марта 2014 года.

Производилось погружение временного ряда на сутки.

Кроме того, для учета суточных и годовых вариаций предсказываемой величины, синус и косинус значений с суточными и годовыми периодами были также использованы в качестве входных данных.



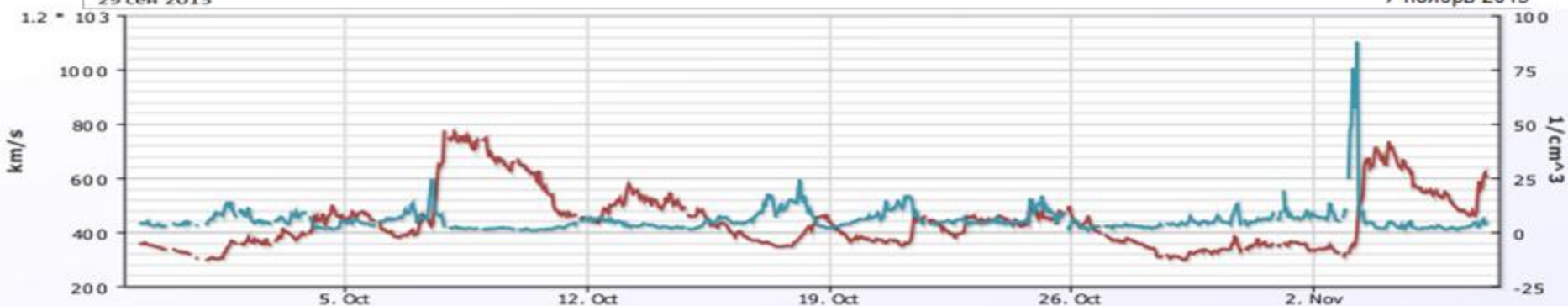
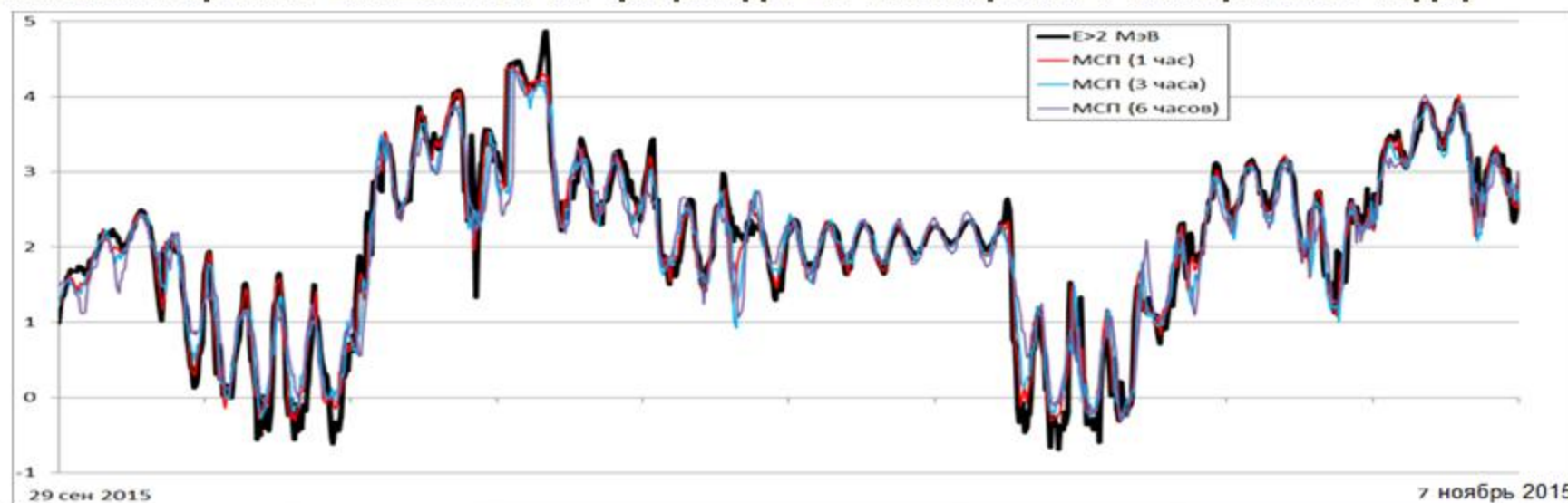
Архитектура и параметры ИНС



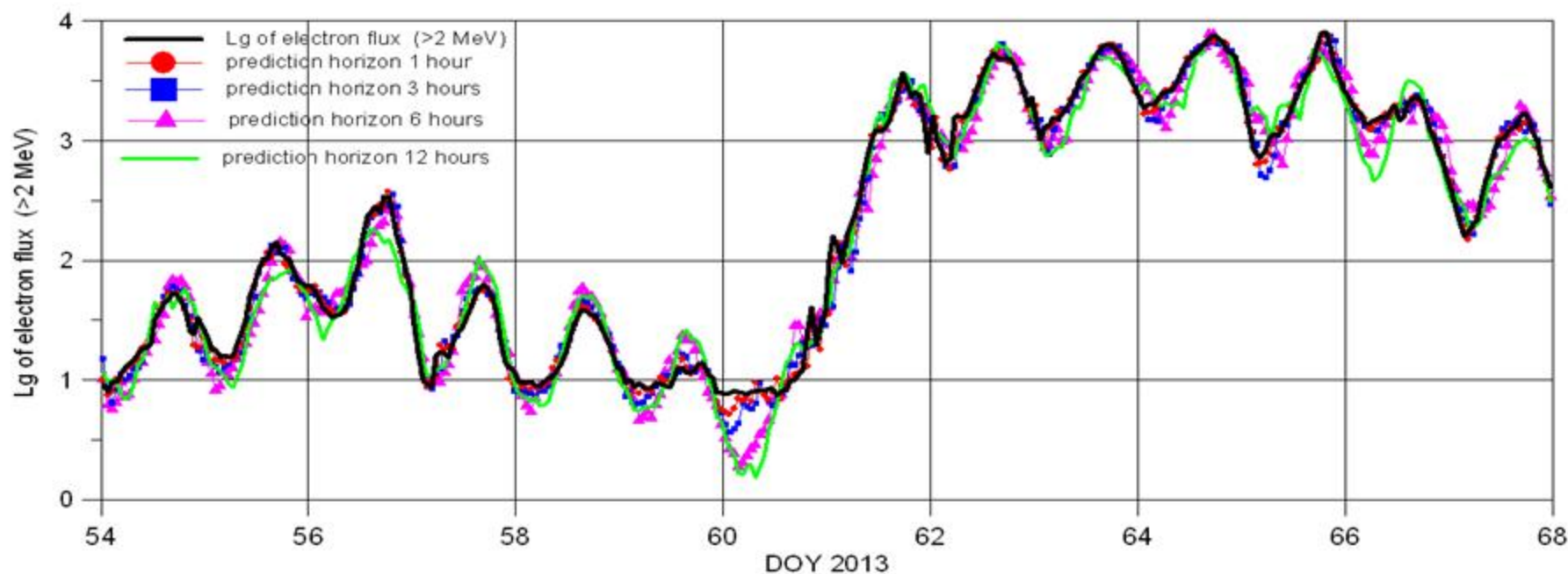
Для всех нейросетевых моделей применялся многослойный персептрон с единственным скрытым слоем из 32 нейронов. Предыдущие исследования показали, что использование большего количества слоёв и/или нейронов не приводит к улучшению результатов прогнозирования. В качестве передаточной функции для всех нейронов использовалась логистическая. ИНС обучалась по алгоритму обратного распространения ошибки со скоростью 0.01 и моментом 0.5. Остановка производилась в случае, если в течение 500 эпох не улучшался результат работы сети на тестовом наборе.

Для каждой модели было обучено по 5 сетей с различными наборами начальных весов, ответы усреднялись, и для усредненного результата считались оценки качества работы модели. Это означает использование простейшего комитета однородных прогнозирующих моделей.

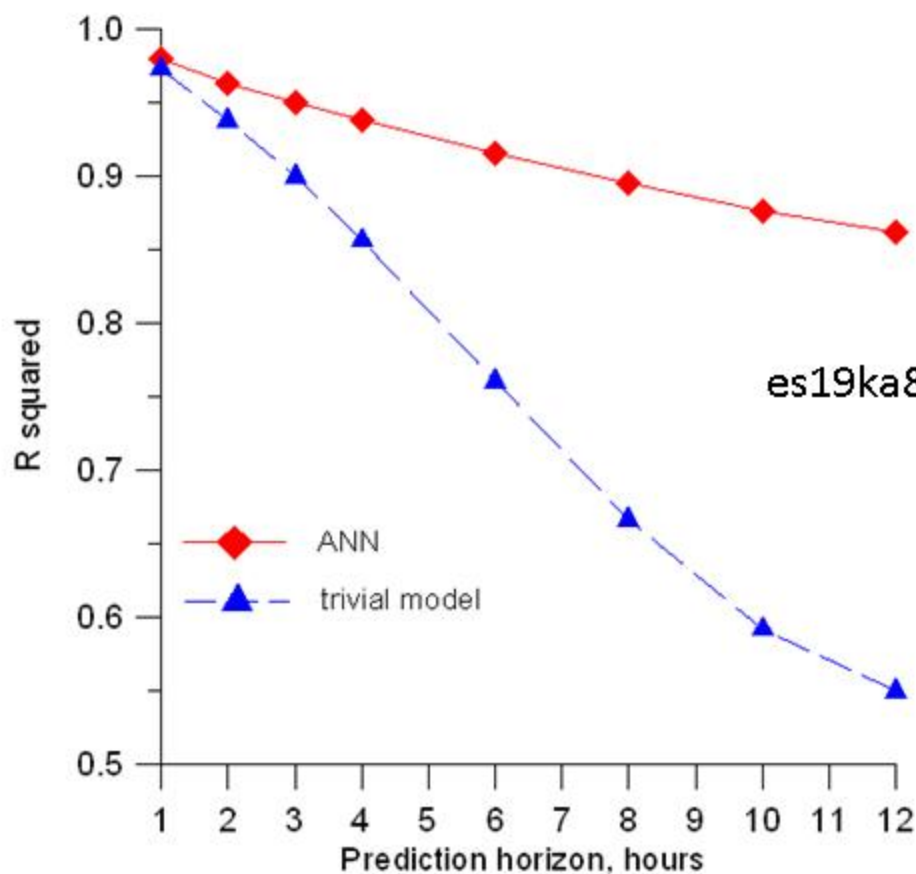
Сравнение измеренного и предсказанного временного ряда десятичного логарифма потока электронов внешнего РПЗ (период с 29 сентября по 7 ноября 2015 года)



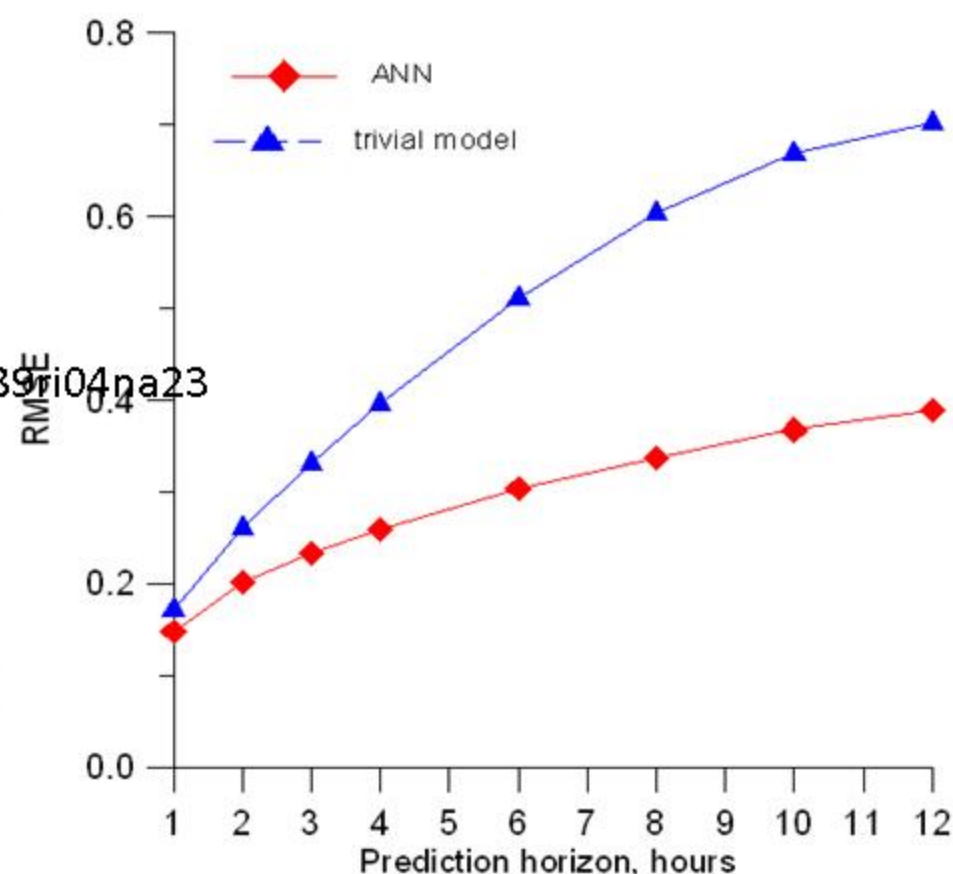
Сравнение измеренного и предсказанного временного ряда десятичного логарифма от потока электронов внешнего РПЗ (период с 23 февраля 10 марта 2013 года)



Показатели качества прогнозирования для логарифма поток электронов (> 2 МэВ). Среднее по 5 ИНС с различными наборами начальных весов

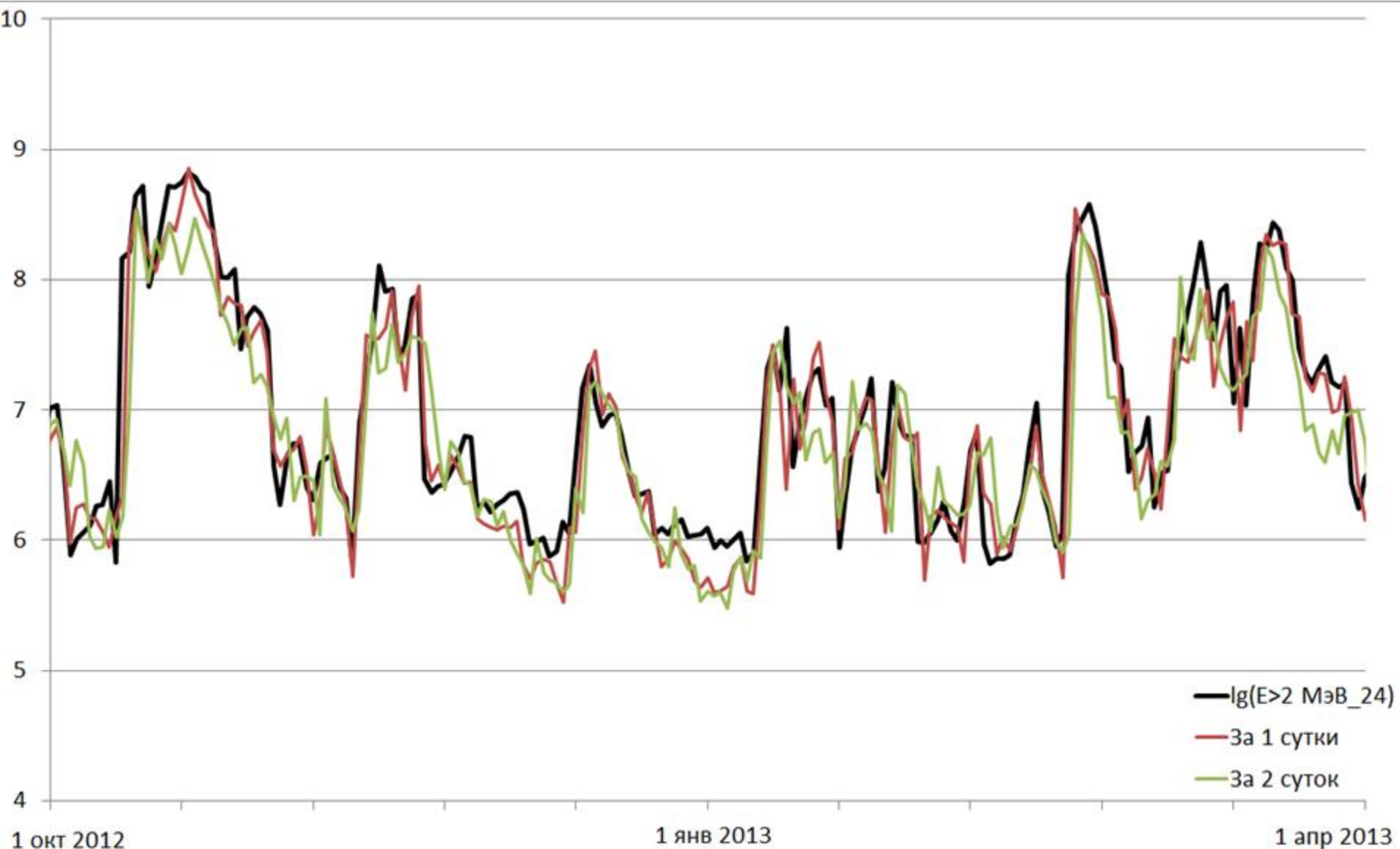


Коэффициент множественной
детерминации R^2
для разных горизонтов прогноза

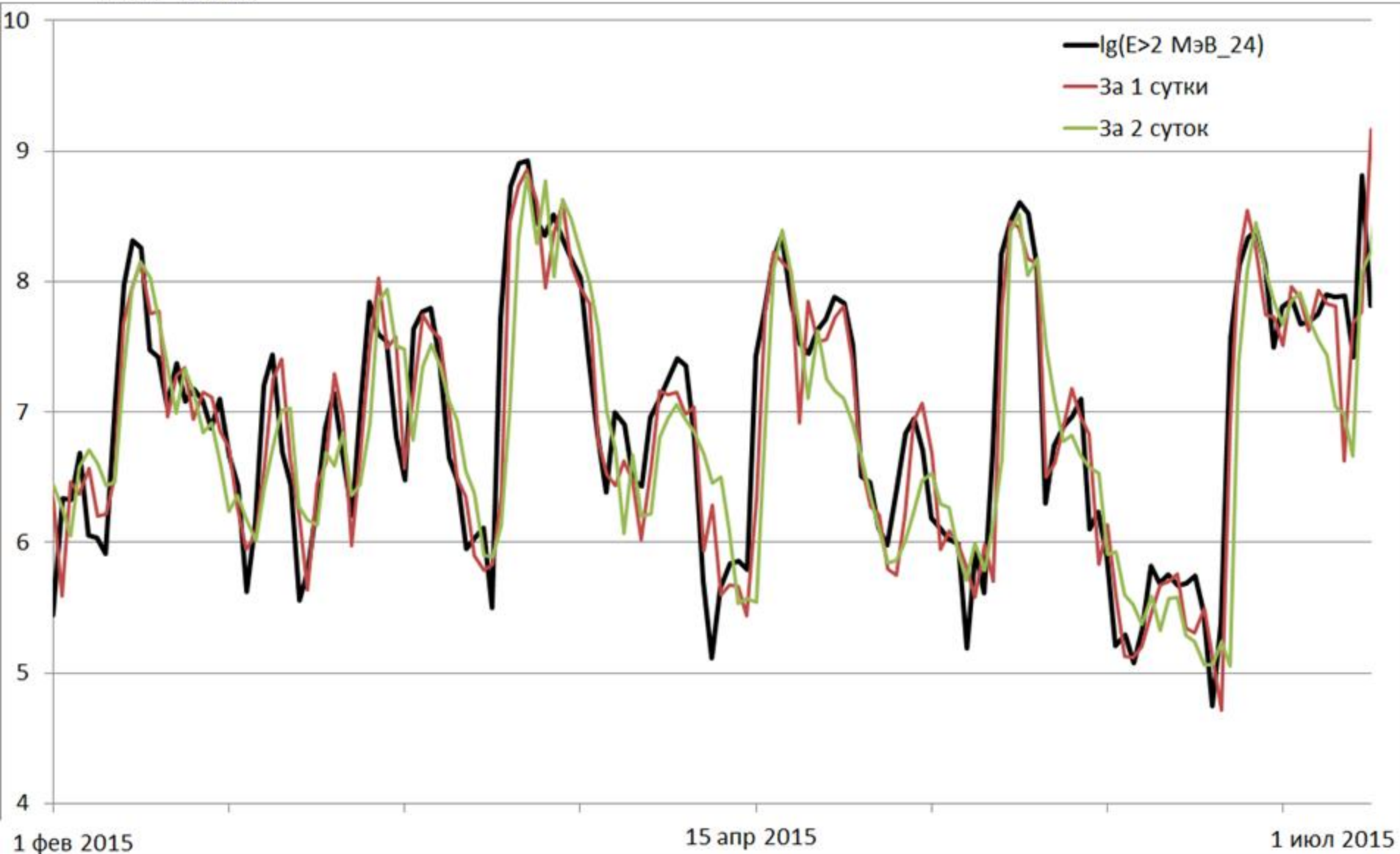


Средняя квадратичная ошибка
для разных горизонтов прогноза

Сравнение измеренного и предсказанного временного ряда десятичного логарифма потока электронов внешнего РПЗ (период с 1 октября 2012 по 1 апреля 2013 года)



Сравнение измеренного и предсказанного временного ряда десятичного логарифма потока электронов внешнего РПЗ (период с 1 февраля по 1 июля 2015 года)



Другие модели прогнозирования

Метод Группового учета аргументов (МГУА)

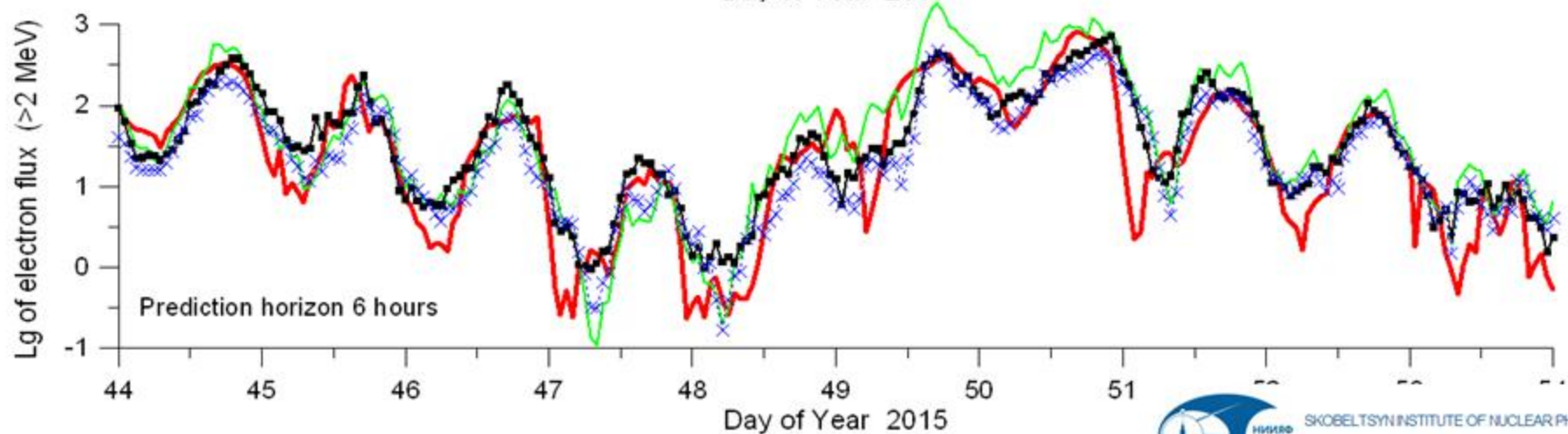
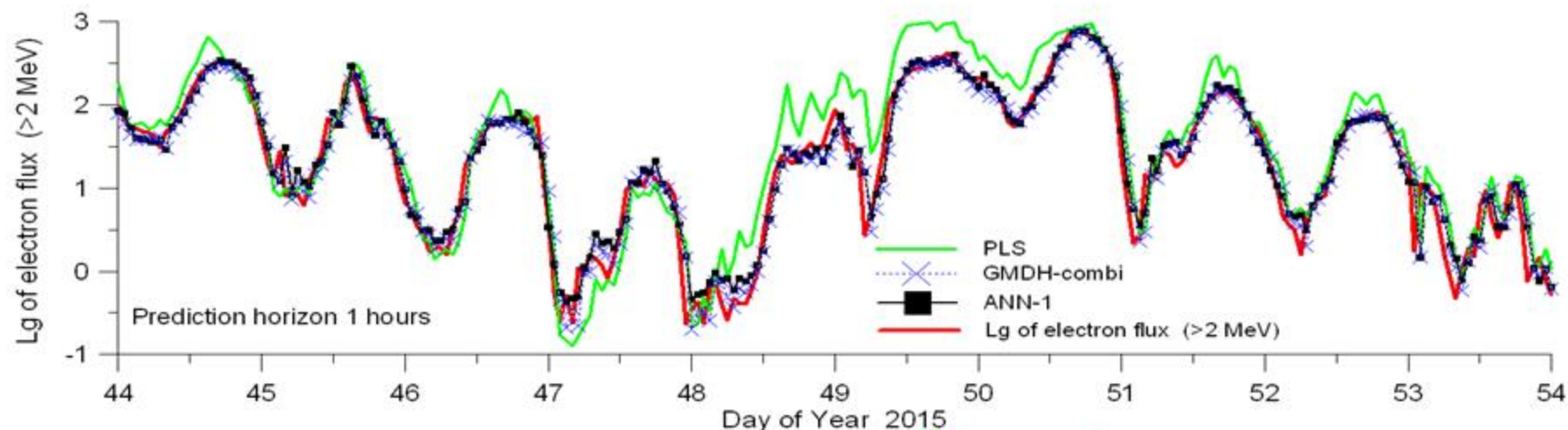
Это семейство индуктивных алгоритмов для математического моделирования мультипараметрических данных. Метод основан на рекурсивном селективном отборе моделей, на основе которых строятся более сложные модели. Точность моделирования на каждом следующем шаге рекурсии увеличивается за счет усложнения модели. Мы использовали МГУА в рамках программного пакета GMDH Shell , в двух режимах - комбинаторной и МГУА нейронной сети. Комбинаторный режим МГУА дал лучший результат, он и показан далее.

Метод PLS

Представляет собой взаимозависимое разложение матриц X (матрица входов) и Y (матрица выходов). Метод основан на принципе анализа главных компонент. На основании последнего, создается матрица коэффициентов ρ которая обеспечивает решение задачи.



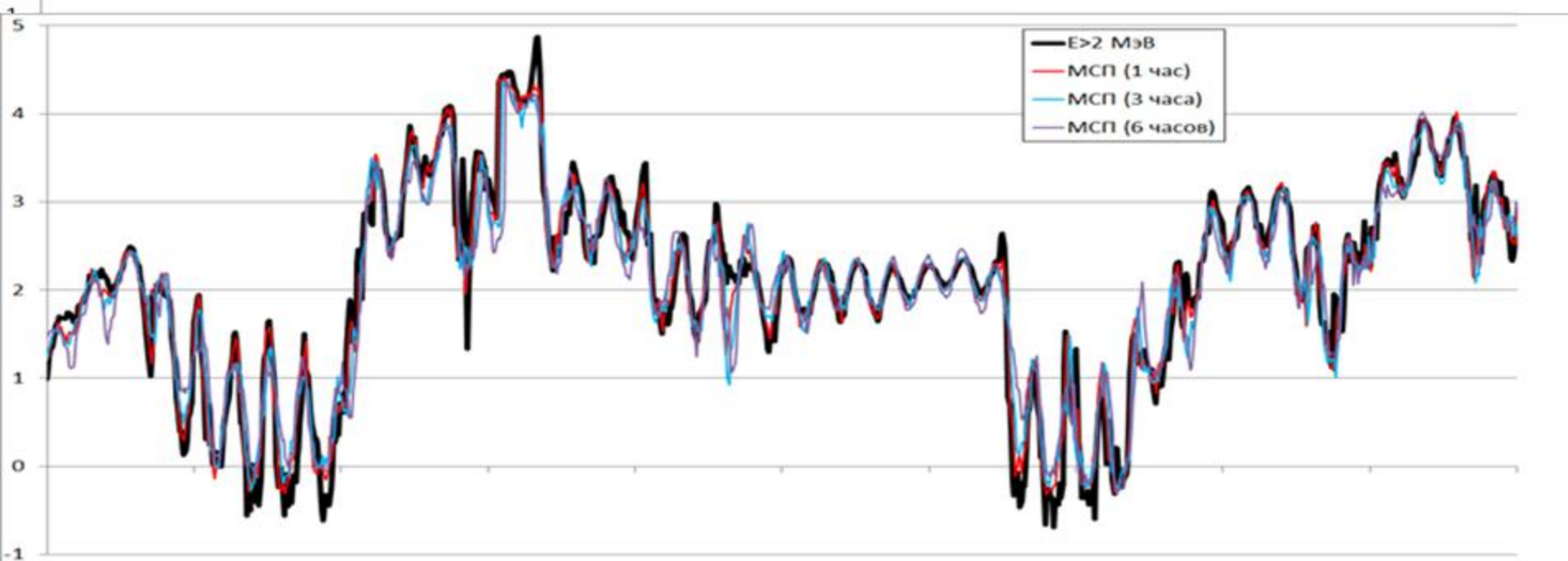
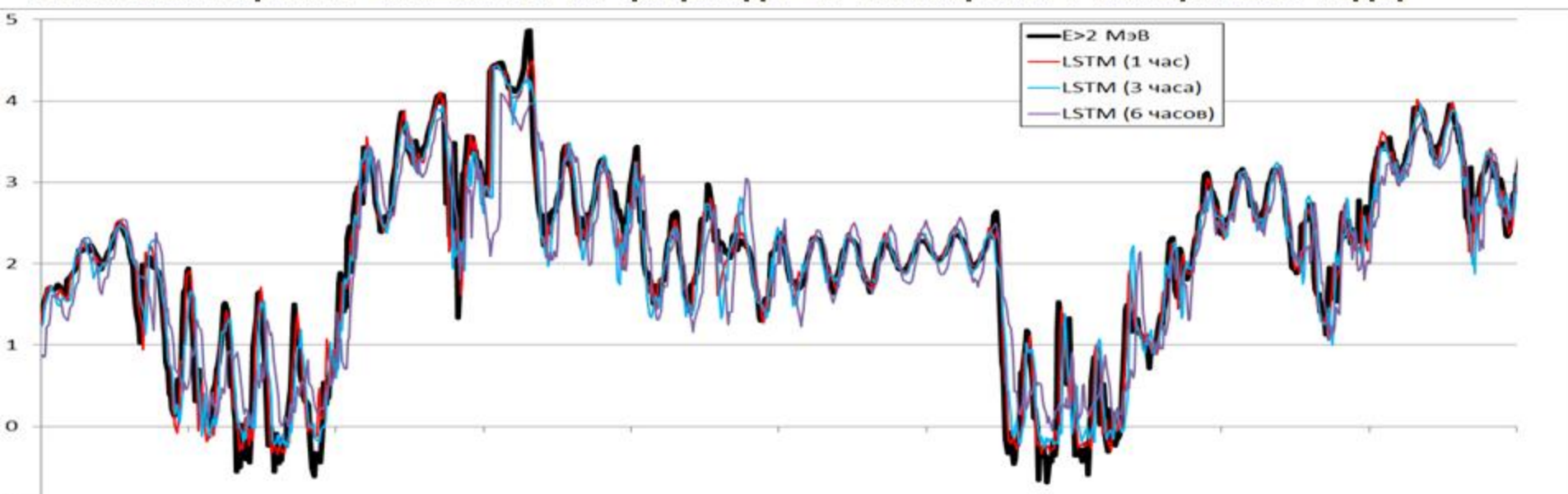
*Пример сравнения результатов
прогнозирования разными методами
для десяти дней февраля 2015 года*



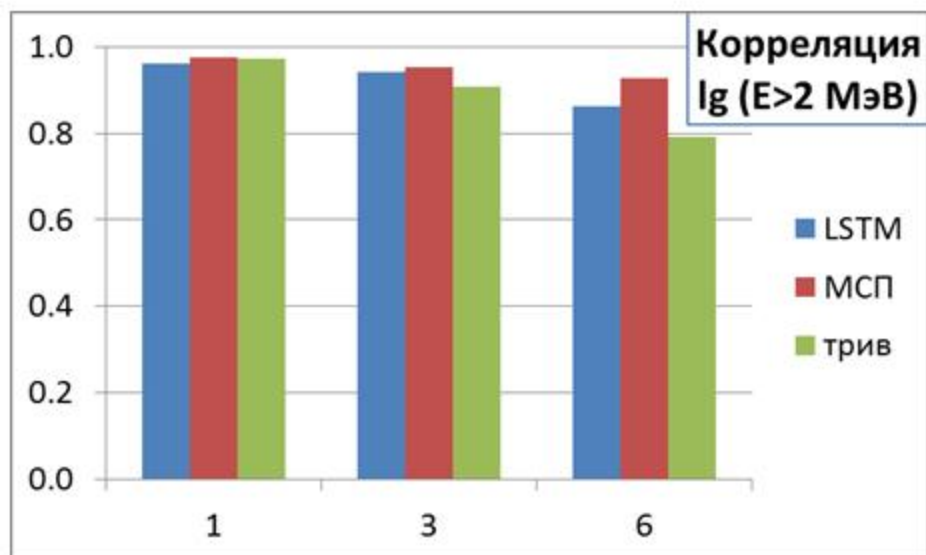
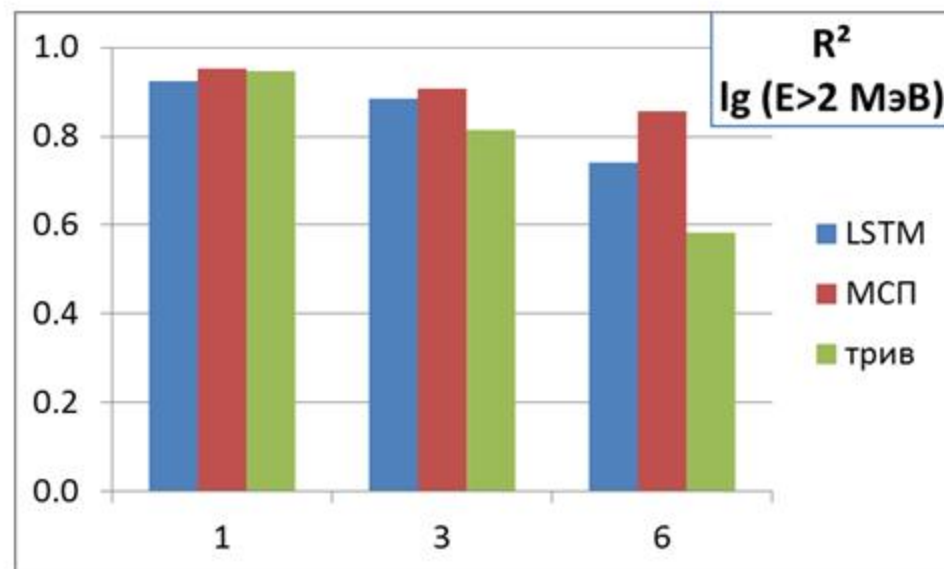
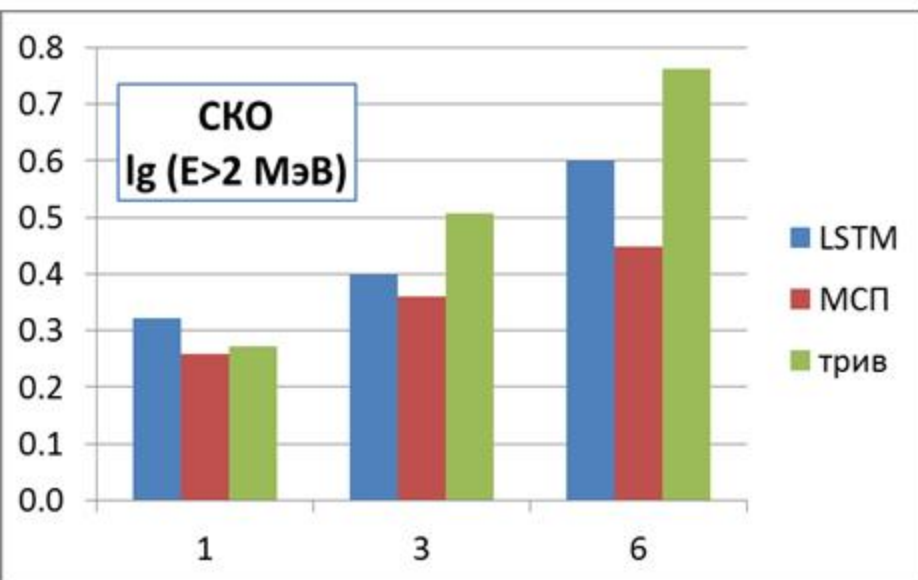
Рекуррентны нейронные сети

Главным отличием рекуррентных сетей от других нейросетевых архитектур является учёт предыдущих состояний сети при формировании нейросетевого ответа – значения, генерируемые скрытым слоем, подаются на вход вместе со значениями нового примера из обучающей выборки. Такая структура позволяет учесть временную природу подаваемых данных, что положительно сказывается на эффективности работы нейронной сети с временными рядами. В 1997 году была предложена так называемая LSTM нейронная сеть, главным отличием которой от классической рекуррентной сети Элмана является конвейер значений состояния ячейки, из-за чего становится возможным сохранить память на длинные временные промежутки. В связи с появлением новых передаточных функций и градиентных методов обучения данные сети также получили распространение.

Сравнение измеренного и предсказанного временного ряда десятичного логарифма потока электронов внешнего РПЗ (период с 29 сентября по 7 ноября 2015 года)



Статистики прогноза разными моделями



Заключение



- Лучший результат продемонстрировали комбинации многослойных персептронов - среднее значение ответов пяти ИНС, тренировка которых производилась с различными наборами начальных весов.
- Результат прогноза с использованием метода группового учёта аргументов близок к результату ИНС, а прогноз методом проекций на латентные структуры и рекуррентные сети значительно хуже.
- Показано, что с увеличением горизонта прогноза от 1 до 6 часов, качество его снижается, но не радикально. Это дает возможность рассматривать вопрос о дальнейшем увеличении горизонта прогноза.
- Получено, что нейросетевой прогноз суточных флуенсов на 1-2 суток вперед также позволяет получить адекватные результаты.



***Спасибо
за внимание***



SKOBELOTSYN INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY