



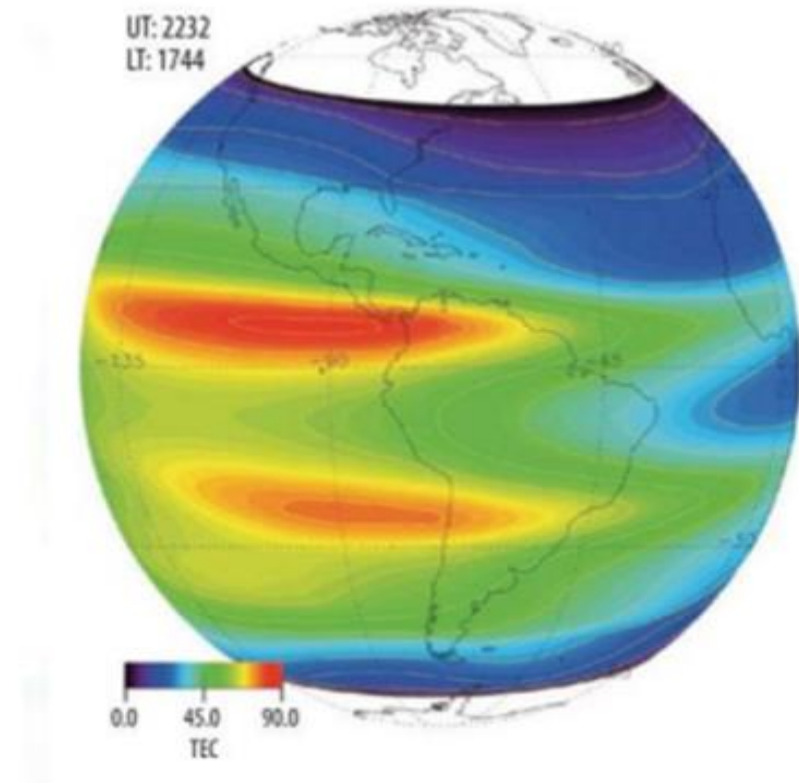
# РАЗЛОЖЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КАРТ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аппалонов А.М.,  
Масленникова Ю.С.,  
Шерстюков О.Н.

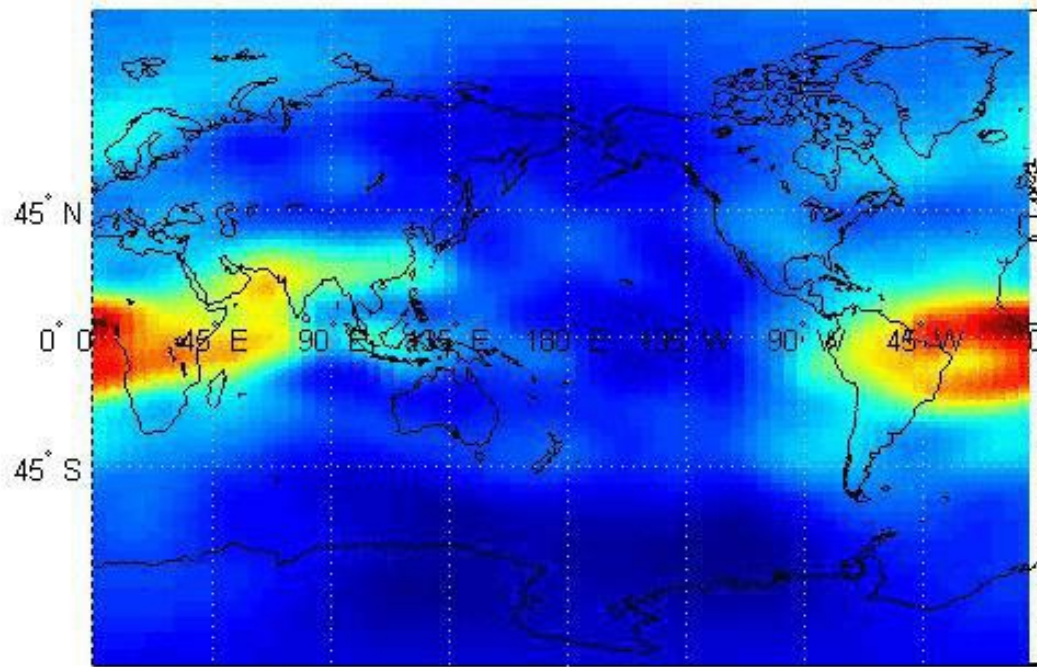
Цель работы: разложение карт полного электронного содержания ионосферы при помощи нейронных сетей.

## Решаемые задачи:

1. Подготовка базы данных карт ПЭС, предварительная обработка карт.
2. Разложение карт ПЭС с использованием нейросетевых подходов на пространственные и временные составляющие.
3. Анализ полученных результатов.



2009 March,3 0:00



MakeAGIF.com

**Глобальные карты лаборатории JPL (Jet Propulsion Laboratory, USA) за 1999-2018 гг. составлялись через каждые 2 часа.**

**Всего 87660 карт.**

**Пространственное разрешение:**

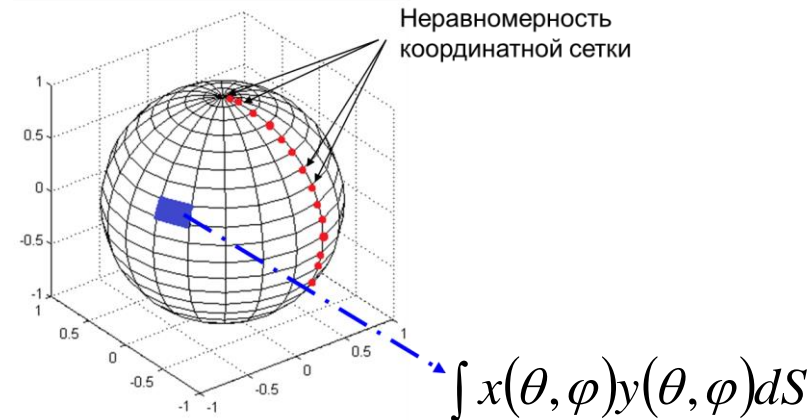
**- 5° по долготе,**

**- 2.5° по широте.**

## 1. Учет системы координат

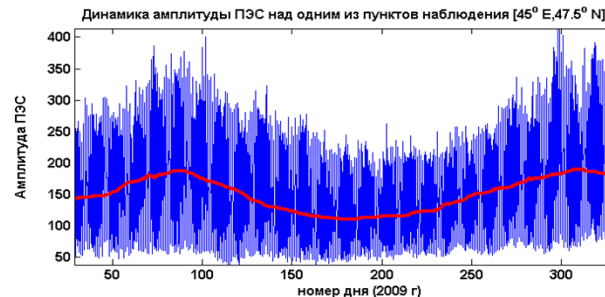
$$(x, y) = \sum_{i,j} K_{ij} x_i y_j$$

$$K = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$



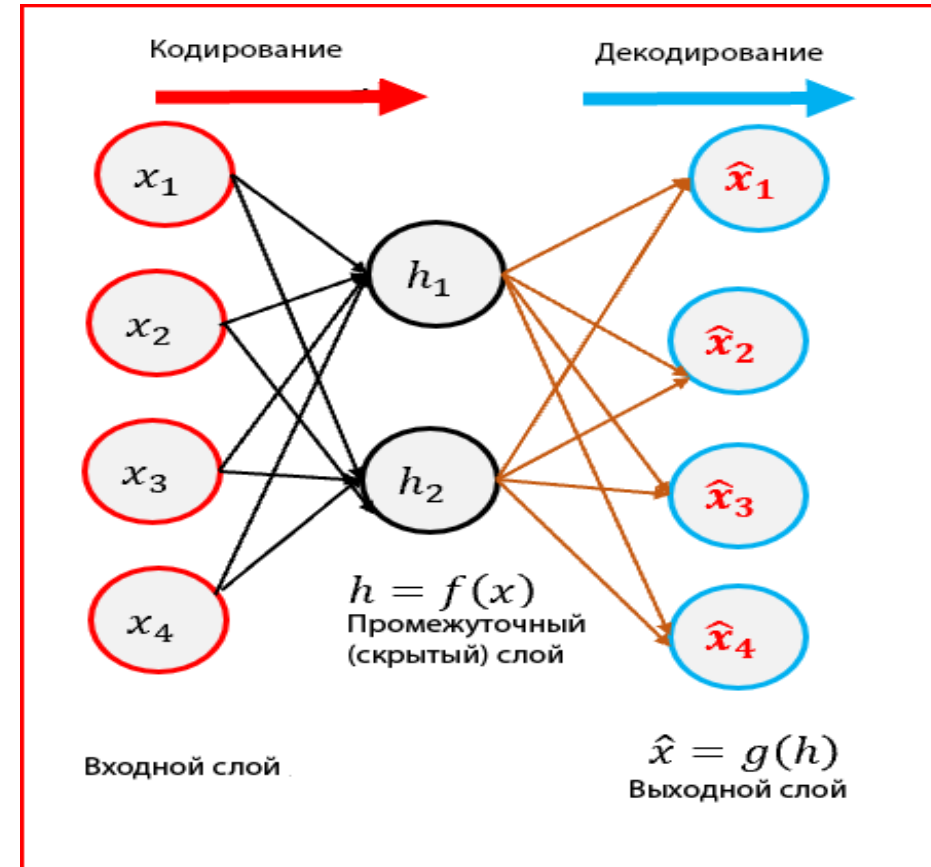
2. Исключение суточной периодичности с использованием сопутствующей СК, когда подсолнечная точка остается неподвижной

3. Исключение сезонной периодичности

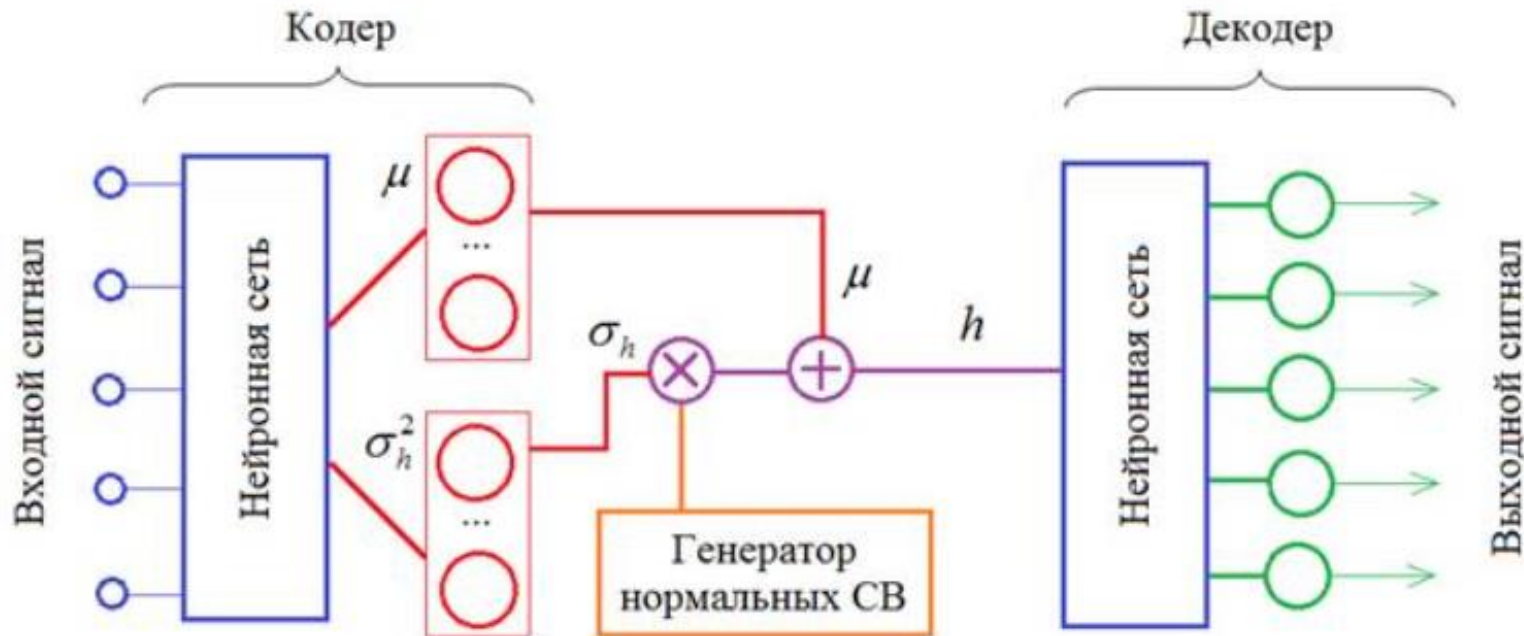


Наиболее популярным подходом для задач матричного разложения является использование нейросетевой архитектуры типа **автокодировщик** (autoencoder - AE) — это тип нейронной сети, предназначенной для обучения компактного представления данных. Он состоит из двух основных частей:

- **кодировщик** (encoder) - эта часть принимает входные данные и сжимает их в более низкоразмерное скрытое пространство, кодировщик учится извлекать важные признаки из данных, игнорируя шум и несущественную информацию;
- **декодировщик** (decoder) - восстанавливает исходные данные по скрытому представлению. Целью является минимизация различий между входными данными и восстановленными данными, что позволяет модели учиться на примерах.



Более развитой архитектурой является **вариационный автокодировщик (variational autoencoder – VAE)**. Он также состоит из тех же двух блоков, но кодировщик тут генерирует параметры распределения (среднее и дисперсию) для скрытого пространства по исходным точкам, а не переводит их в фиксированное представление, что делает более мощным инструментом для задач генерации.





Сравнение двух нейросетевых алгоритмов производилось при помощи проверки качества восстановления исходных данных (глобальных карт). Для такого подойдут стандартные метрики, которые применяются для задач регрессии:

- *mean absolute error* - *MAE* (средняя абсолютная ошибка):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

- *root mean square error* – *RMSE* (средняя квадратическая ошибка):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

- *weighted absolute percentage error* - *WAPE* (взвешенная абсолютная процентная ошибка):

$$WAPE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}$$

| МЕТРИКА | АЕ   | VAE  |
|---------|------|------|
| MAE     | 0.32 | 0.27 |
| RMSE    | 0.41 | 0.37 |
| WAPE    | 0.14 | 0.12 |

Видно, что вариационный автокодировщик показывает сравнительно лучшие результаты, однако, учитывая, что это более сложная архитектура, требующая больших ресурсов, для задач сжатия данных обычный автокодировщик также хорошо подходит.

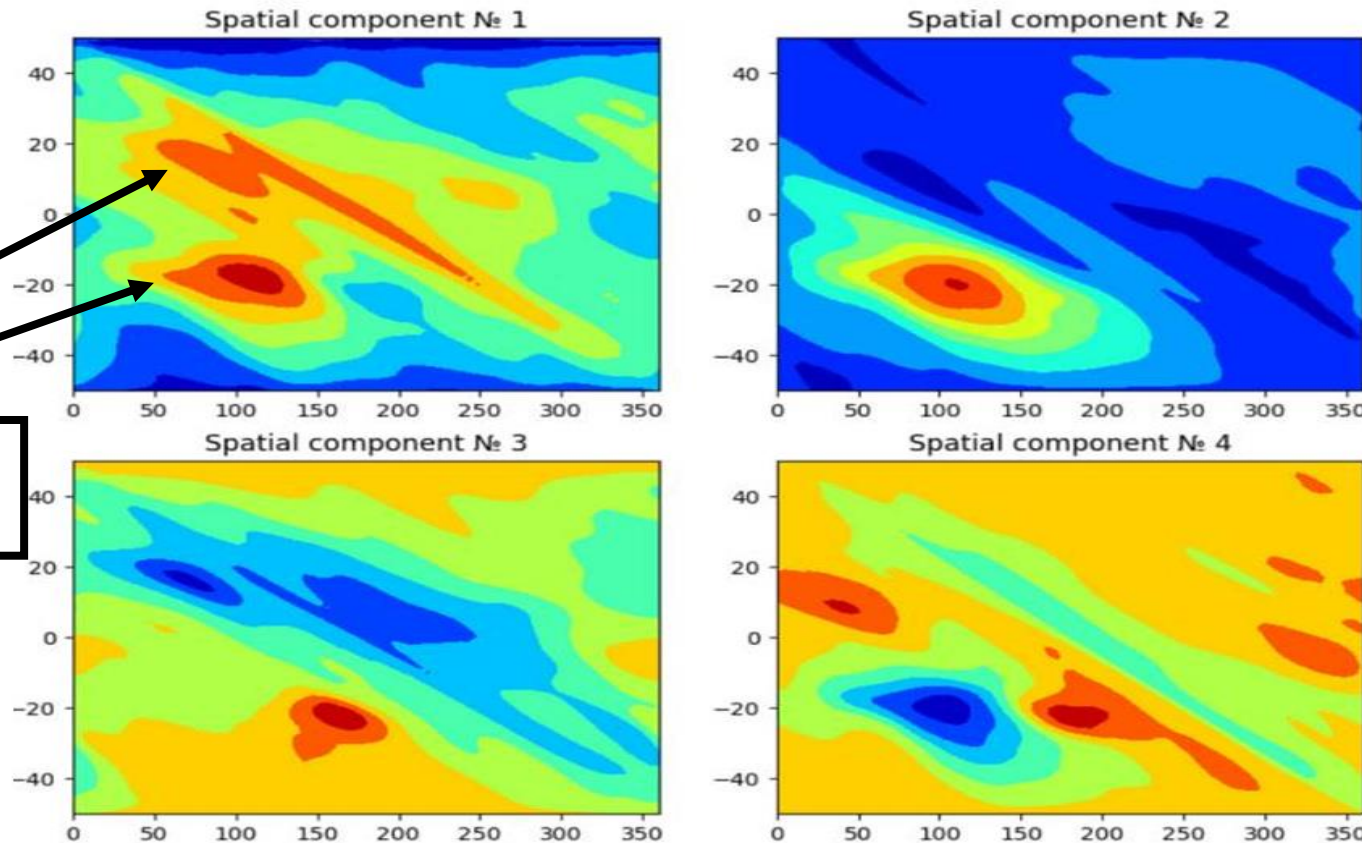


Дополнительно было проведено разложение с добавлением на вход нейронной сети данных о критической частоте главного максимума ионизации foF2, взятых с сети лабораторий GIRO (GLOBAL IONOSPHERE RADIO OBSERVATORY). Гипотеза состояла в том, что это может помочь повысить качество восстановления исходных полных карт глобального электронного содержания.

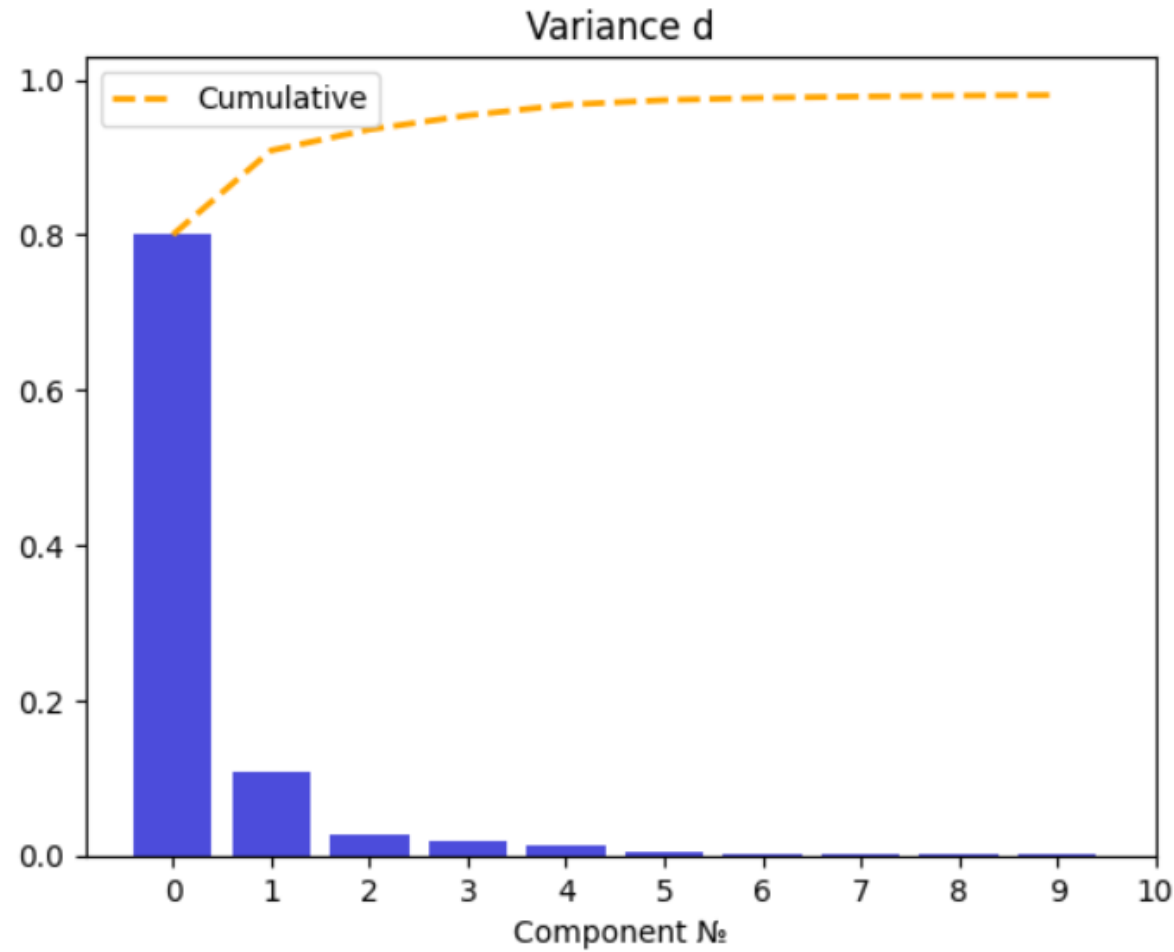
Сравнение производилось на основе обычного автокодировщика.

| МЕТРИКА | AE   | AE + foF2 |
|---------|------|-----------|
| MAE     | 0.32 | 0.15      |
| RMSE    | 0.41 | 0.21      |
| WAPE    | 0.14 | 0.11      |

Далее показаны результаты пространственного и временного разложения глобальной карты ПЭС при помощи обычного автокодировщика с добавлением на входных данных о критической частоте главного максимума ионизации foF2.

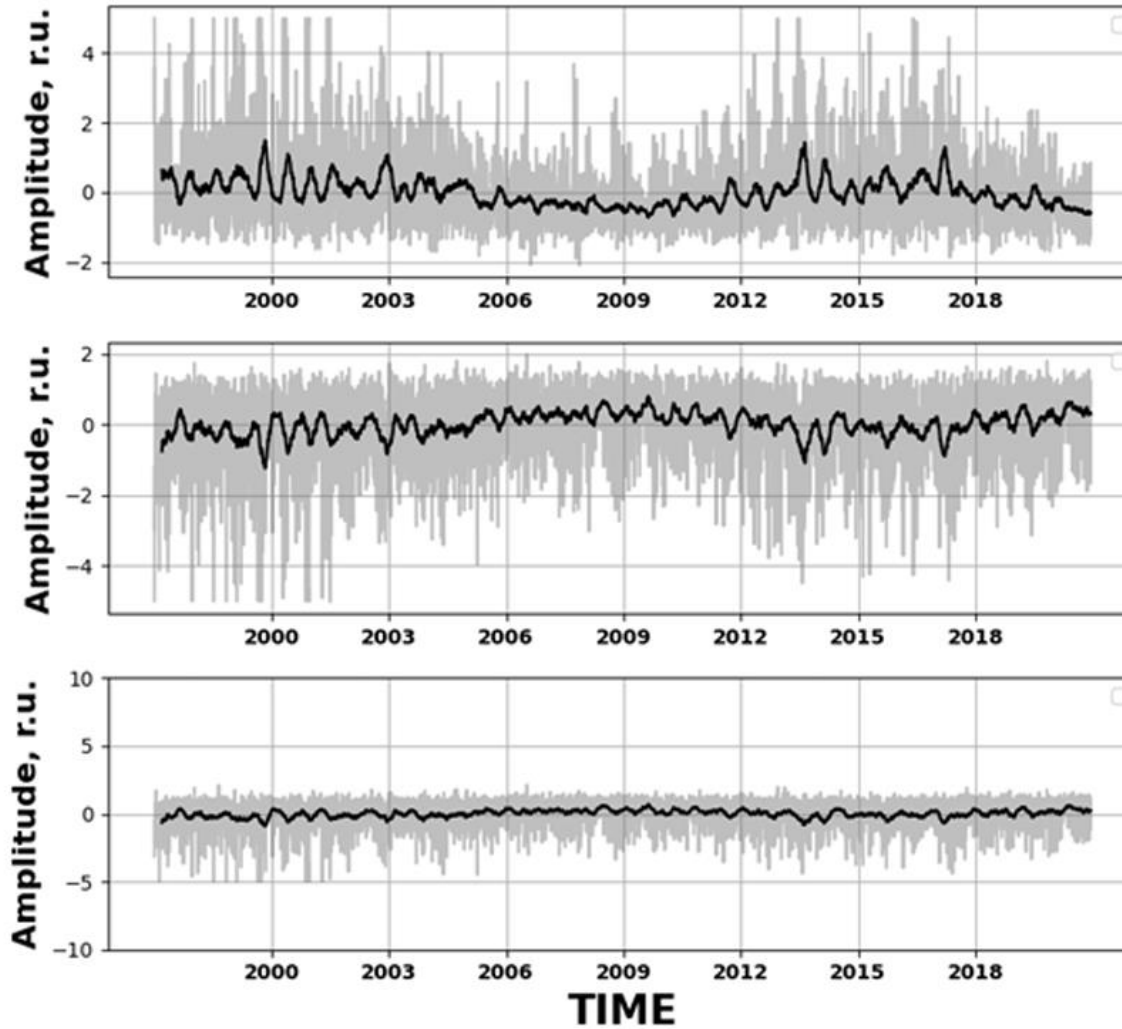


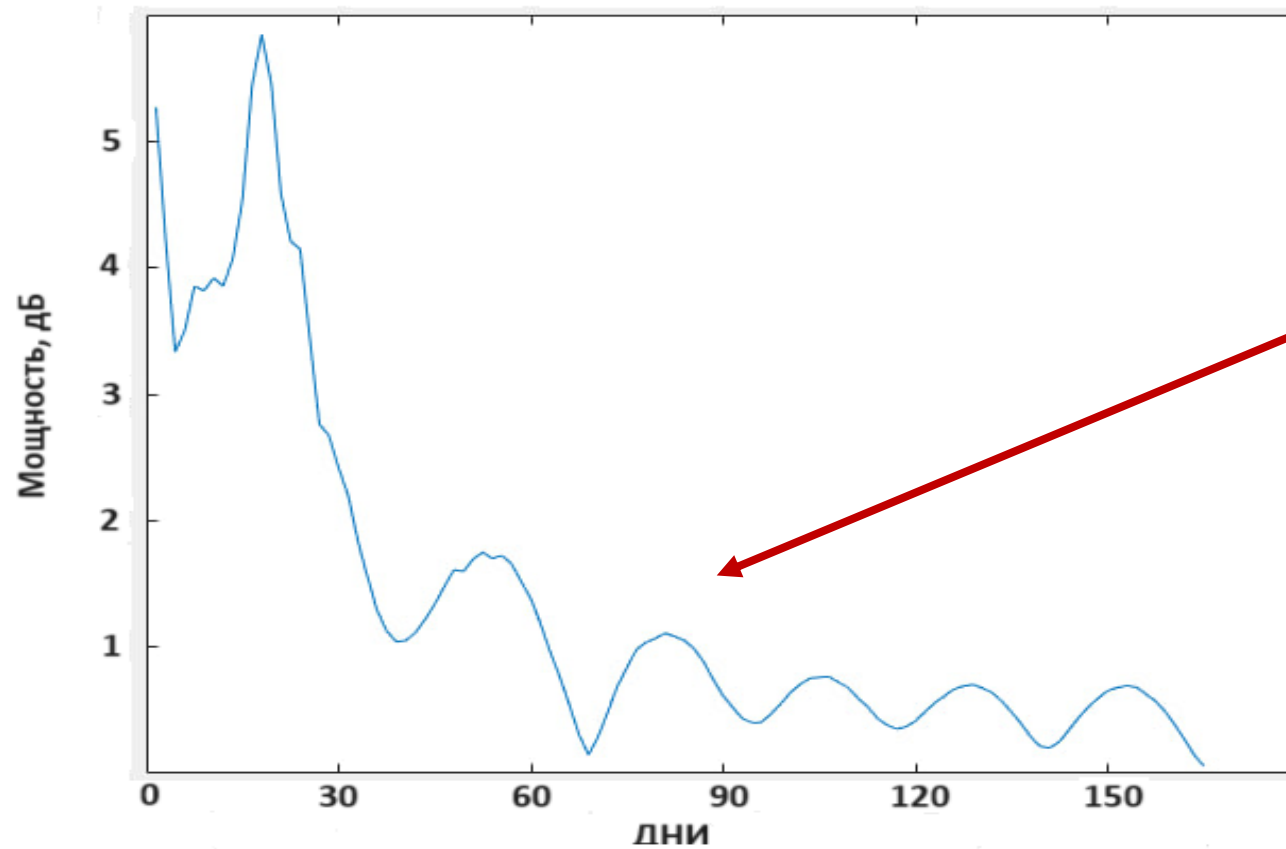
Экваториальная  
аномалия



Общий вклад 10 главных компонент пространственного разложения в общую вариацию ПЭС ~ 93 %

# Анализ временных вариаций ПЭС





«Спектр» первой временной компоненты разложения

Видно наличие циклической составляющей ~ 26-28 дней, что близко к периоду вращения Солнца

В работе представлены результаты проведенного анализа пространственно-временной динамики ионосферы с использованием карт полного электронного содержания за 23-й, 24-й циклы солнечной активности при помощи нейросетевого подхода:

- Обе архитектуры – как обычный автокодировщик, так и вариационный автокодировщик, показывают хорошее качество восстановления исходных данных.
- При добавлении на вход данных о критической частоте ионизации главного максимума foF, качество восстановления улучшается.
- Полученные результаты свидетельствуют о наличии корреляции между точками, близкими к экватору, соответствующие экваториальной аномалии.
- При рассмотрении первой пространственной компоненты разложения, а также о присутствии циклических изменений в период повышенной солнечной активности у первой компоненты временного разложения.
- Данные результаты согласуются с анализом, проводимым ранее и описанным в предыдущей работе авторов, в основу которого были положены классические линейные алгоритмы разложения



**Спасибо за внимание!**