

Построение глобальных карт VTEC

Збродов Владислав 22С03

17 декабря 2025 г.

1 Введение

Цель работы – реализовать алгоритм глобальных карт вертикального полного электронного содержания (VTEC) по данным порядка 500 ГНСС-станций. Сравнить их устойчивость к разрежению сети станций

2 Исходные данные

В качестве входных данных использовались:

- координаты станций (долгота, широта, имя) из файла `stations.txt`, содержащего ~ 500 ГНСС-станций с неравномерным глобальным распределением; сеть сгущена в Северной Америке и Европе и разрежена над океанами и в высоких широтах;
- С архива данных <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/> были получены наблюдательные и навигационные файлы;
- С помощью ПО `tec-suite` и `TayAbsTEC` была получена информация о VTEC по станциям за 319, 320 и 321 дни 2025 года;

Для анализа также формируется модифицированная сеть, в которой из Северной Америки (окно долгот $[-150^\circ, -40^\circ]$ и широт $[5^\circ, 80^\circ]$) удаляется часть станций (около 100), что позволяет оценить чувствительность метода к разрежению сети.

3 Метод моделирования VTEC

Глобальное поле VTEC аппроксимируется сферическими гармониками до степени $l_{\max} = 5$:

$$V(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\lambda + b_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi),$$

где φ — географическая широта, λ — долгота, P_n^m — присоединённые полиномы Лежандра, а a_{nm}, b_{nm} — искомые коэффициенты.

Коэффициенты находятся методом взвешенных наименьших квадратов.

Весовая матрица W формируется на основе среднего расстояния до ближайших соседей на сфере: станции в сгущённых регионах получают меньший вес, а в разрежённых — больший.

Результирующая карта строится на регулярной широтно-долготной сетке с шагом 2° по широте (от -90° до 90°) и 2° по долготе (от 0° до 360°). В областях, удалённых от станций (океаны), применяется сглаживание.

4 Построение карт CODE

Для суток строятся 12 карт по данным CODE (по 2-часовым интервалам). (используются для сравнения)

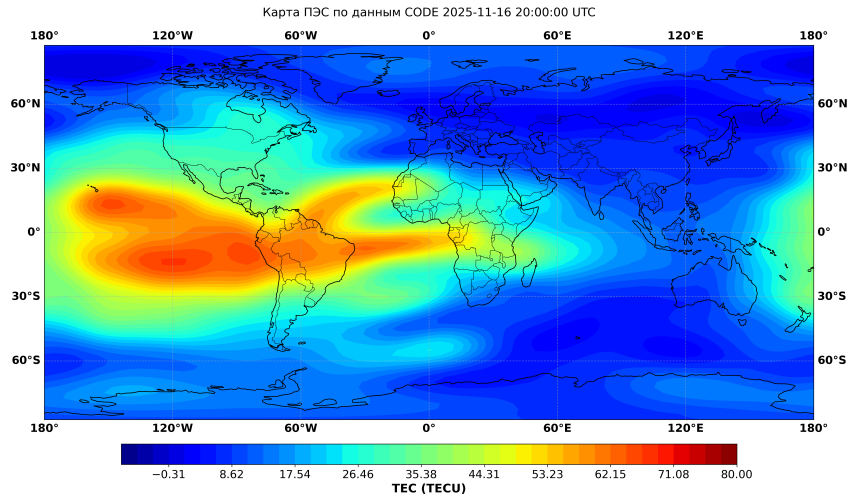


Рис. 1: Карта CODE на 320, 20 UT

5 Эксперимент с разрежением сети станций

Для оценки чувствительности модели к плотности сети дополнительно рассматривается модифицированная сеть (CUT), в которой из Северной Америки удаляется часть станций (около 100). Для каждого интервала:

1. строится карта VTEC для исходной сети (FULL);
2. строится карта VTEC для усечённой сети (CUT) с теми же параметрами модели;
3. на исходной широтно-долготной сетке вычисляется разность

$$\Delta VTEC_{\text{self}}(\varphi, \lambda) = V_{\text{FULL}}(\varphi, \lambda) - V_{\text{CUT}}(\varphi, \lambda);$$

Такой эксперимент показывает, как локальное разрежение сети влияет на восстановление глобального поля VTEC, особенно в дневных условиях над Северной Америкой и соседними акваториями.

6 Примеры результатов

Ниже приводятся несколько характерных рисунков; полный набор карт не включается, но приведен в архиве.

6.1 Глобальные карты VTEC

Карты для полной и разреженной сетей. На рис. 2 показаны примеры.

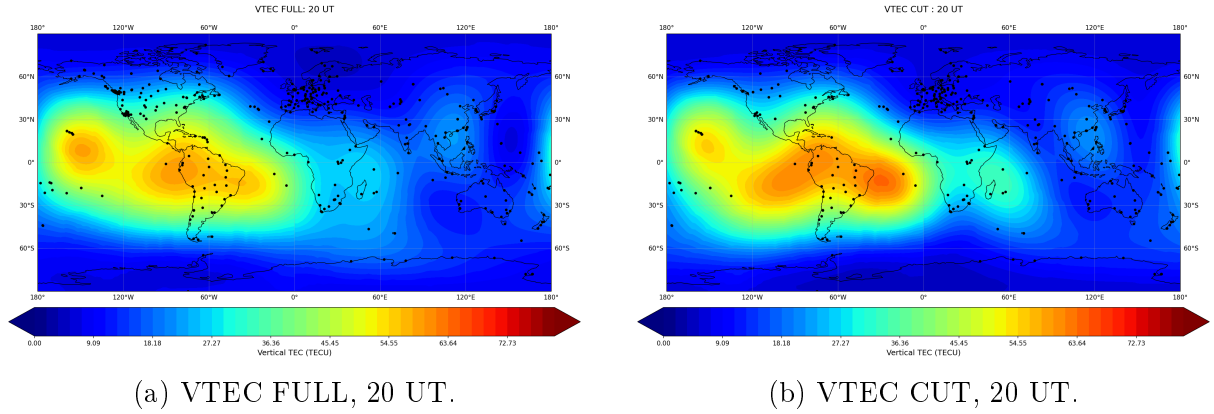


Рис. 2: Примеры глобальных карт VTEC (День 320, 20UT).

На картах дополнительно показаны чёрные точки, соответствующие координатам использованных GNSS-станций. По ним видно сгущение сети в Северной Америке и Европе и разрежение над океанами.

6.2 Карты FULL – CUT

Разностные карты для полной и разреженной сетей для Северной Америки. На рис. 3 показаны примеры. FULL – полная сеть приемников, а CUT – модифицированная, с меньшим количеством приемников.

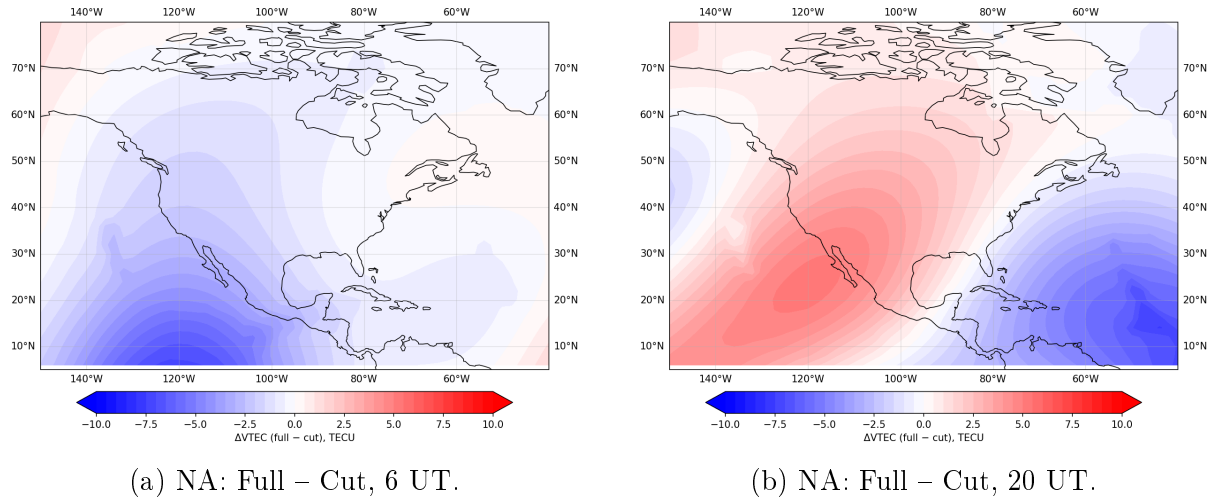


Рис. 3: Разностные карты.

Цветовая шкала ограничена примерно ± 10 TECU, и значительная часть области лежит в пределах

$$\Delta VTEC_{full-cut} \leq 5$$