

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский
университет)»
Физтех-школа аэрокосмических технологий
Кафедра теоретической и экспериментальной физики геосистем

Направление подготовки: 03.03.01 Прикладные математика и физика (бакалавриат)
Направленность(профиль) подготовки: Физика и механика космических и природных систем

Пространственно-временное распределение полного
Электронного содержания в различных
геофизических условиях
(бакалаврская работа)

Студент:
Скачков Алексей Павлович

Научный руководитель:
Ряховский Илья Александрович

Москва
2020

Аннотация

Цели и задачи

Целью данной работы являлось получение пространственно-временного распределения полного электронного содержания во время солнечной вспышки класса X.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- обработка данных со станций GNSS
- вычисление наклонного ПЭС по групповым и фазовым измерениям
- оценка вертикального значения ПЭС
- нахождение пространственных и временных зависимостей изменения ПЭС

Полученные результаты

В данной работе проводилось исследование влияния солнечной вспышки на абсолютное значение полного электронного содержания, а именно рассмотрение зависимости отклика ПЭС на изменение зенитного угла Солнца.

Для получения результатов был использован метод TayAbsTEC, который позволяет рассчитать абсолютное значение ПЭС. Работоспособность данного метода была подтверждена с помощью верификации полученных результатов для приемника, расположенного в ГФО «Михнево», по данным мировых сетей.

По полученным результатам для станций, которые находились под непосредственным влиянием Солнца, была построена зависимость пикового значения временной производной ПЭС от зенитного угла Солнца во время вспышки, показывающая резкий рост пикового значения производных при увеличении зенитного угла начиная с его некоторого значения.

Также были рассмотрены распределения вариации ПЭС в зависимости от изменения координат широты и долготы, которые подтвердили полученную зависимость пикового значения временной производной ПЭС от зенитного угла Солнца.

Содержание

Введение	4
1 Теоретические сведения	5
1.1 Использование GPS в исследовании ионосферы	5
1.2 Общие сведения о GPS	6
1.3 Интересующие виды измерений в GPS	7
1.4 Геометрические положения, используемые для GPS зондирования	9
1.5 Принципы расчета ПЭС по данным GPS приемников	11
1.5.1 Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псев- додальности	11
1.5.2 Определение ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности . .	12
1.5.3 Преобразование наклонного ПЭС в вертикальное	12
1.5.4 Дифференциальные кодовые задержки	13
2 Исследовательская работа	14
2.1 Обработка данных со станций GNSS	14
2.2 Вычисление наклонного ПЭС по групповым и фазовым измерениям . .	16
2.3 Оценка вертикального значения ПЭС	18
2.4 Нахождение пространственных и временных зависимостей измерения ПЭС	20
2.4.1 Распределение вариации ПЭС по широте	26
2.4.2 Распределение вариации ПЭС по долготе	27
3 Заключение	29

Введение

Актуальность темы

Исследование ионосферы является достаточно важным направлением, так как от ее состояния зависит множество факторов, влияющих на нашу повседневную жизнь. Знание о состоянии ионосферы может помочь идентифицировать различные события техногенного и естественного характеров. В современной действительности стало ясно, что различные ионосферные процессы влияют на погодные и климатические условия. Не стоит забывать и о современных средствах связи, навигации и локации, которые напрямую зависят от состояния ионосферы.

Объект исследования

Основными параметрами, характеризующими ионосферу, являются: локальная электронная концентрация N_e , температура ионов и электронов и полное электронное содержание.

Объектом исследования данной работы являлось пространственно-временного распределения ПЭС в условиях солнечной вспышки класса X. ПЭС (полное электронное содержание) представляет собой интегральную величину численно равную количеству электронов в столбе с площадью основания один квадратный метр.

1 Теоретические сведения

1.1 Использование GPS в исследовании ионосферы

Появление глобальной навигационной системы и создание огромной сети GPS станций стали началом новой эры дистанционного исследования ионосферы. Большое количество станций и непрерывная доступность спутников позволили производить своеевременный мониторинг ионосферы в различных участках планеты.

1.2 Общие сведения о GPS

GPS (Global Positioning System) представляет из себя спутниковую систему навигации, которая обеспечивает измерение расстояния между спутником и приемником, а также времени. На основе этих данных определяется местоположение объекта в пространстве.

Систему GPS можно разделить на три основные составляющие:

- Космический сегмент
- Сегмент управления
- Сегмент потребителей

Космический сегмент состоит из 32 спутников (один из которых находится на этапе развертки)¹, которые размещены на шести круговых орбитах. Высота орбит составляет 20200 км. Наклонение орбит также является общим и равно 55° . Каждая орбита разнесена друг относительно друга на 60° по долготе. Спутники оборудованы специальным устройством, которое хранит системное время аппарата. Временные шкалы всех спутников согласованы между собой и синхронизируются системой единого времени.

Спутники непрерывно передают сигналы на двух частотах: $f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.60$ МГц. Передаваемые сигналы модулируются псевдослучайными последовательностями (PRN - Pseudorandom Noise) двух типов С/А-код и Р-код.

С/А-код является открытым кодом, который, в основном, используется в гражданских целях. Он имеет длину повторения 1 мс и частоту следования импульсов 1.023 МГц.

Р-код - это защищенный код. Частота следования имеет значение 10.23 МГц и длину в 267 суток. Сигналы, модулированные Р-кодом, передаются на двух частотах f_1 и f_2 , в то время как С/А-код только на f_1 .

Вместе с PRN-кодами также отправляются навигационные сообщения, которые содержат данные о положении спутника, метки времени, частотно-временные поправки, сведения о работоспособности оборудования и др.

Сегмент управления осуществляет слежение за орбитальными аппаратами и управление ими. Главная станция находится в Колорадо-Спрингс, штат Колорадо. Станции слежения выполняют измерения траекторий по сигналам спутников и после корректируют поведение каждого спутника.

Сегмент потребителей состоит из устройств разной степени сложности, от военного оборудования до гражданских мобильных устройств. GPS-приемники производят выбор рабочего созвездия (набора из не менее 4 видимых спутников), поиск, слежение и декодировку входящего сигнала, обработку измеряемых радионавигационных параметров и служебной информации, расчет координат и скорости потребителя.

¹на момент февраля 2019 года [1]

1.3 Интересующие виды измерений в GPS

Основная величина, которая измеряется в спутниковых системах позиционирования, является «псевдодальность», через которую определяют координаты GPS-приемника.

$$D' = \sqrt{(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2} + c\tau_R + \sigma_D, \quad (1)$$

где D' - «псевдодальность» между приемником и спутником; x_S, y_S, z_S – координаты спутника; x, y, z – координаты приемника; c – скорость света; τ_R - отклонение часов приемника от системного времени GPS; σ_D – погрешность измерения. Псевдодальность отличается от действительного расстояния $D = \sqrt{(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2}$ наличием ошибок измерений. Зная значения псевдодальности для 4 спутников, можно вычислить координаты приемника и значение τ_R . Нахождение данных величин возможно в любой момент времени, так как в поле зрения приемника всегда оказывается минимум 5 спутников. В современных устройствах для вычисления положения в пространстве используется метод взвешенных наименьших квадратов. Для определения псевдодальности измеряются такие параметры, как время распространения сигнала и набег фазы несущей радиоволны на трассе «спутник – приемник». В зависимости от выбранного параметра различают кодовые и фазовые измерения псевдодальности.

Кодовые измерения псевдодальности. $D' = ct$. В данном случае измеряется время задержки между моментом излучения и момента получения сигнала, т.е. время распространения сигнала. Для измерения задержки, с помощью корреляционного анализа, определяется сдвиг выбранного кода, посланного спутником, относительно кода, генерируемого приемным устройством. Таким образом, двухчастотный приемник имеет возможность измерять псевдодальность тремя способами: с помощью С/А-кода на частоте f_1 и по Р-коду на частотах f_1 и f_2 ². Точность определения псевдодальности по кодовым измерениям составляет 1% от длины кода, что позволяет делать измерение по С/А-коду с погрешностью в 3 метра, а по Р-коду с погрешностью 0.3 метра.

Фазовые измерения псевдодальности. $D' = \lambda\Delta\varphi + \lambda N$. Для получения псевдодальности в этом случае измеряется разность фаз $\Delta\varphi$ двух несущих радиоволн: принятой приемником и сгенерированной в самом приемнике; $\lambda = c/f$ – длина волны несущей частоты. Для фазовых измерений на частотах f_1 и f_2 приняты обозначения $L1$ и $L2$ соответственно. Полное число циклов фазы N остается неизвестной величиной. Этому дали название «фазовой неоднозначностью измерений». Для ее устранения существует ряд способов, одним из которых является комбинирование кодовых и фазовых измерений. Погрешность измеренной разности фаз $\Delta\varphi$ имеет точность до 0.01 периода. Тогда псевдодальность может быть определена с точностью до 1-2 мм.

²измерение по С/А-коду обозначается как $C1$, а для Р-кода соответственно $P1$ и $P2$

Погрешности измерений. На точность измерений влияет множество факторов, которые представлены в таблице 1 [2], [3].

Источник погрешности	Вносимая погрешность
Геометрическое расположение НИСЗ	PDOP
Неточности расчетов орбит НИСЗ и времени	0.5 – 3 м
Случайные отклонения орбит и часов	0.5 – 3 м
Шумы приемника	1.5 – 3 м
Задержка сигнала в ионосфере	2 – 10 м
Задержка сигнала в тропосфере	1 – 2 м
Многолучевость распространения (в результате отражений от крупных объектов вблизи приемника)	1 – 2 м
Меры по искусственному снижению точности (с Мая 2000 года не используется)	до 30 м
Прочие источники	1 м

Таблица 1 – Составляющие погрешности навигационных определений

Наиболее важным фактором для получения хорошей точности является геометрия рабочего созвездия спутников. Для характеристики взаимного расположения приемника и спутника вводится коэффициент PDOP (Position Dilution of Precision)³. На данный коэффициент умножается все другие ошибки.

Вторым по значимости фактором, снижающим точность, является ионосферная задержка радиосигнала. Именно из-за этого эффекта GPS может использоваться для исследования состояния ионосферы.

Для снижения ионосферной и тропосферной погрешностей измерений используются математические модели, комбинирование данных, сглаживание данных и режим DGPS⁴.

Комбинация кодовых и фазовых измерений и использование их в алгоритмах сглаживания данных позволяют эффективно фильтровать погрешности, связанные с геометрией рабочего созвездия, шумами приемника, случайными отклонениями орбит часов и многолучевостью.

³Величина PDOP обратно пропорциональна объему фигуры, образованной пересечение лучей «спутник – приемник» со сферой единичного радиуса, центр которой совмещен с приемником.

⁴Суть метода заключается в том, что измерения производятся двумя приемниками, один из которых неподвижен (для него известно истинное положение). Неподвижный приемник сравнивает свое истинное положение с положением, полученным с GPS, и отправляет поправочные коэффициенты второму приемнику.

1.4 Геометрические положения, используемые для GPS зондирования

Для расчета полного электронного содержания необходимо знать направление на спутник. На рисунке 1, можно увидеть схематическое представление геометрии системы «Земля – спутник».

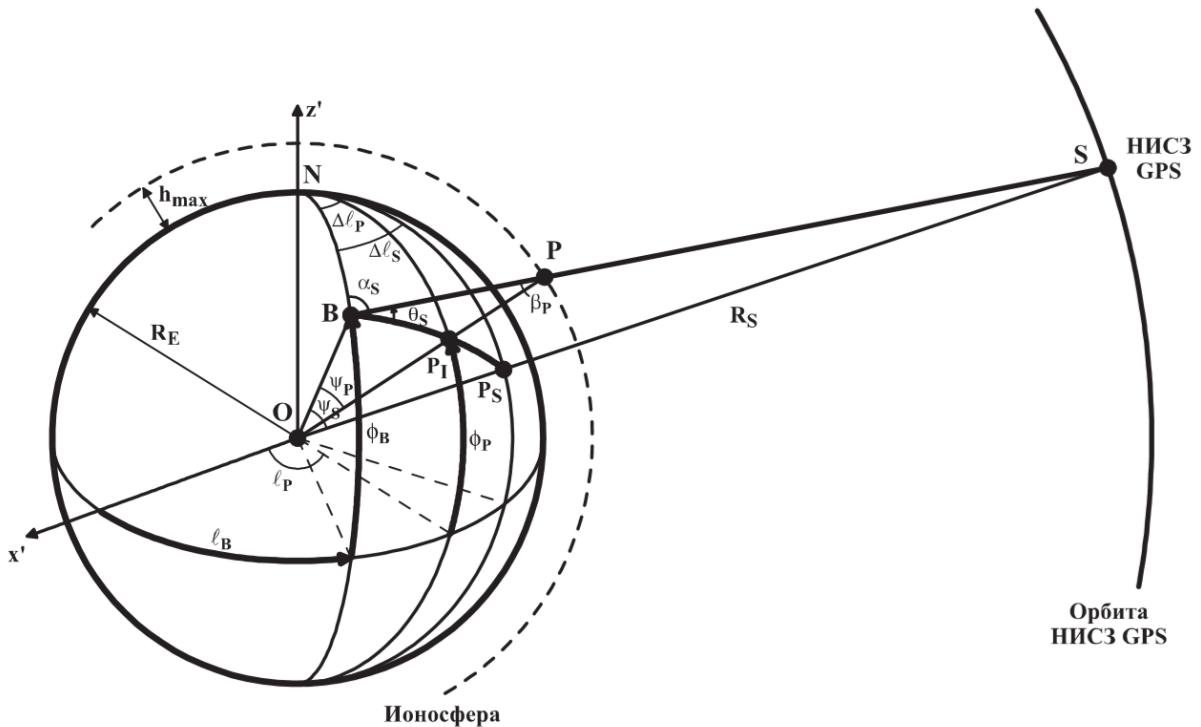


Рис. 1 – Геометрия системы «Земля – спутник»: O – центр Земли; S – спутник; B – пункт наблюдения; P – ионосферная точка; P_I – подионосферная точка; P_S – подспутниковая точка; h_{\max} – высота максимума слоя F2 ионосферы. [4]

Для вычисления координат α_S , θ_S , которые являются, соответственно, азимутом и углом места (элевацией), используется метод расчета на основе геодезических координат спутника и точки наблюдения. С достаточной для практических целей точностью азимут и угол места могут быть вычислены с помощью формул [5]:

$$\begin{aligned} \alpha_S &= \arccos \left(\frac{\sin \Phi_S - \sin \Phi \cos \psi_S}{\sin \sigma \cos \Phi} \right); \\ \theta_S &= \arctan \left(\frac{\cos \Psi_S - R_E/R_S}{\sin \Psi_S} \right); \\ \Psi_S &= \arccos (\sin \Phi \sin \Phi_S + \cos \Phi \cos \Phi_S \cos (\Lambda_S - \Lambda)), \end{aligned} \quad (2)$$

где R_S – радиус орбиты спутника; R_E – радиус Земли; Φ, Λ – геодезические широта и долгота точки наблюдения; Φ_S, Λ_S – геодезические широта и долгота спутника; Ψ_S – центральный угол между точкой наблюдения и спутником.

Для вычисления координат ионосферной и подионосферной точек используются следующие выражения:

$$\begin{aligned}
\phi_P &= \arcsin(\sin \phi_B \cos \psi_P + \cos \phi_B \sin \Psi_P \cos \alpha_S); \\
l_P &= l_B + \arcsin(\sin \Psi_P \sin \alpha_S \sec \phi_P); \\
\Psi_P &= \frac{\pi}{2} - \theta_S - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cos \theta_S\right),
\end{aligned} \tag{3}$$

где ϕ_B, l_B – географические координаты точки наблюдения; α_S, θ_S – азимут и угол места луча «приемник – спутник»; Ψ_P – центральный угол между точкой наблюдения и ионосферной точкой; ϕ_P, l_P – широта и долгота ионосферной точки

1.5 Принципы расчета ПЭС по данным GPS приемников

1.5.1 Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевододальности

При распространении сигнала вдоль луча «приемник – спутник» возникает набег фазы, который определяется формулой [6]:

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\pi f_{1,2}}{c} \int_0^D n_{1,2} ds + \varphi_0, \quad (4)$$

где f_1 и f_2 – рабочие частоты GPS; $\varphi_{1,2}$ – набег фазы для частот f_1, f_2 ; φ_0 некоторая неизвестная начальная фаза; $n_{1,2}$ – коэффициент преломления в ионосфере для сигналов f_1, f_2 ; D – расстояние между приемником и передатчиком.

При пренебрежении влиянием соударений и магнитного поля Земли, коэффициент преломления будет иметь вид [6], [7]:

$$n_{1,2} \approx 1 - \frac{40.308 N_e}{f_{1,2}^2}, \quad (5)$$

где N_e – локальная электронная концентрация.

Тогда выражение для набега фазы примет вид:

$$\varphi_{1,2} = \frac{2\pi f_{1,2}}{c} D - 40.308 \frac{2\pi}{cf_{1,2}} \int_{S_{bot}}^{S_{top}} N_e ds + \varphi_0, \quad (6)$$

где S_{bot} и S_{top} – высота нижней и верхней границы ионосферы, соответственно. В этом равенстве величина $I = \int_{S_{bot}}^{S_{top}} N_e ds$ называется полным электронным содержанием.

Учитывая, что длина волны $\lambda = c/f$, а $L = \varphi/2\pi$ – число оборотов фазы, то уравнение можно записать как:

$$L_{1,2}\lambda_{1,2} = D - \frac{40.308}{f_{1,2}^2} I + \varphi_0. \quad (7)$$

Из последнего выражения можно получить формулу для определения ПЭС:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}_{1,2} + \sigma L], \quad (8)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере; L_1 и L_2 – фазовые измерения GPS-приемника на соответствующих частотах; $\text{const}_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений; σL – ошибка измерения фазы.

Измерения фазы, получаемые с помощью GPS, имеют достаточно высокую точность, так как ошибка в определении ПЭС при 30-секундных интервалах усреднения не превышает 10^{14} м^{-2} (или 0.01 TECU).

Единица измерения, принятая для описания ПЭС, является TECU (Total Electron Content Unit). Ее значение равно 10^{16} м^2 .

1.5.2 Определение ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности

Сейчас будет рассмотрен метод определения ПЭС по данным кодовых задержек. Групповой путь радиоволны определяется формулой [6]:

$$P_{1,2} = c\tau_{1,2} = \int_0^D n'_{1,2} ds, \quad (9)$$

где $P_{1,2}$ – групповой путь для соответствующих частот; $\tau_{1,2}$ – время распространения сигналов; $n'_{1,2} = n_{1,2} + f_{1,2} \frac{\partial n_{1,2}}{\partial f_{1,2}}$ – групповой показатель преломления в ионосфере для соответствующих сигналов. Учитывая выражение (5):

$$n'_{1,2} \approx 1 + \frac{40.308 N_e}{f_{1,2}^2}. \quad (10)$$

Используя две предыдущие формулы, можно получить формулу для определения ПЭС, аналогичную фазовым измерениям:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma P], \quad (11)$$

где σP – ошибка измерения по псевдодальности по P -коду.

Стоит заметить, что ПЭС, вычисленный по формуле (11), также содержит некоторую аддитивную константу, которая зависит от станции и спутника, которая, вероятнее всего, связана с частотно-зависимыми задержками в аппаратуре [8]. Кроме того, такие данные сильно зашумлены по сравнению с фазовыми измерениями. Рисунок 2 демонстрирует различную зашумленность ПЭС.

Из-за высокого уровня шума в данных, определенных по кодовым задержкам, делает практически невозможным выделение вариаций ПЭС, обусловленными неоднородностями электронной концентрации в ионосфере. Таким образом, в ионосферных исследованиях предпочитают использовать ПЭС, измеренный фазовым методом.

1.5.3 Преобразование наклонного ПЭС в вертикальное

Измеренная по выше описанным формулам величина ПЭС пропорциональная расстоянию между спутником и приемником. В основном при исследовании ионосферных возмущений требуется некоторая нормировка амплитуда вариации ПЭС. С этой целью преобразуют полученные значения «наклонного» ПЭС в эквивалентное «вертикальное», соответствующее углу места $\theta_S = 90^\circ$

Учитывая модель сферической Земли, формула преобразования имеет вид [9]:

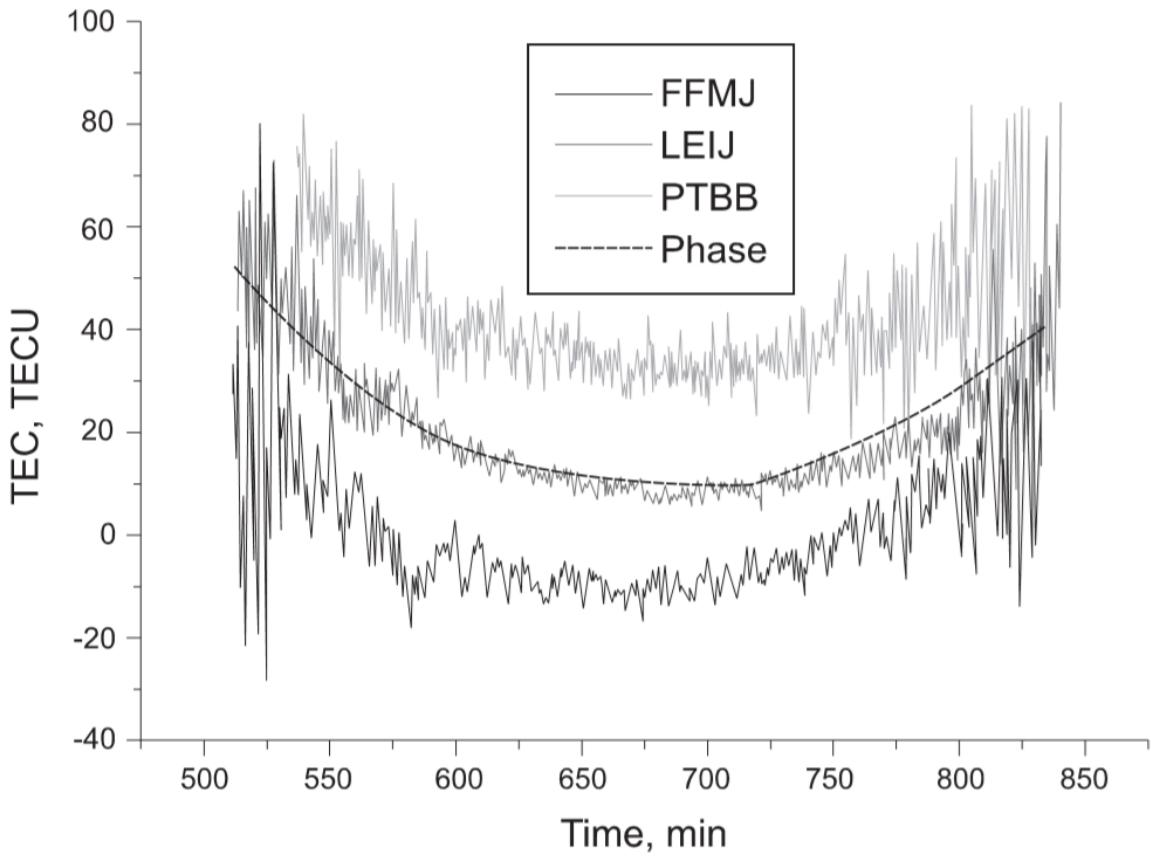


Рис. 2 – Зашумленность ПЭС, вычисленного по данным измерений группового (кривые «FFMJ», «LEIJ» и «PTBB») и фазового (кривая «Phase») запаздывания сигналов GPS [8].

$$I_V = I \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cos \theta_s \right) \right], \quad (12)$$

где I_V – вертикальное значение ПЭС.

1.5.4 Дифференциальные кодовые задержки

Стоит отметить, что при получении абсолютных значений полного электронного содержания, существует систематическая погрешность - ДКЗ (дифференциальная кодовая задержка). Появление ДКЗ связано с тем, что время прохождения сигналов диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приемника и спутника различается, и зависит от частоты сигнала.

ДКЗ определяется с помощью формулы:

$$I_{BIAS} = -\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{1}{40.308} c \Delta \tau, \quad (13)$$

где I_{BIAS} - погрешность в ПЭС из-за влияния ДКЗ, c - скорость света, $\Delta \tau$ - ДКЗ, f_1 и f_2 - первая и вторая частоты.

Также предполагается, что значение ДКЗ не изменяется в течение суток.

2 Исследовательская работа

2.1 Обработка данных со станций GNSS

В ходе данной работы проводилась обработка большого массива данных с наземных ГНСС приемников, которые использовали специальный формат записи RINEX (Receiver Independent Exchange Format).

Существуют различные версии данного формата, каждый из которых поддерживает различные типы файлов: файл с данными наблюдений, файлы навигационного сообщения, файл с метеорологическими данными, файл с показаниями часов спутника и приемника.

В рамках данной работы использовались файлы с данными наблюдений и навигационного сообщения. Из этих файлов доставалась информация об измерениях, предоставляемых спутниками, и данные о положении и движении спутников.

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
      2.10          OBSERVATION DATA    M (MIXED)          RINEX VERSION / TYPE
BLANK OR G = GPS,   R = GLONASS,   E = GALILEO,   M = MIXED  COMMENT
XXRINEXO V9.9       AIUB           24-MAR-01 14:43  PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE (NO FEATURES OF V 2.11)  COMMENT
A 9080              MARKER NAME
9080.1.34           MARKER NUMBER
BILL SMITH          ABC INSTITUTE
X1234A123          XX                  ZZZ
234                YY
4375274.          587466.          4589095.          APPROX POSITION XYZ
               .9030          .0000          .0000          ANTENNA: DELTA H/E/N
               1             1
               1             2             6             G14            G15            G16            G17            G18            G19          WAVELENGTH FACT L1/2
               0
               5             P1            L1            L2             P2            L5
               18.000
2005            3             24            13            10            36.0000000          RCV CLOCK OFFS APPL
                                         # / TYPES OF OBSERV
                                         INTERVAL
                                         TIME OF FIRST OBS
                                         END OF HEADER
                                         -.123456789
05 3 24 13 10 36.0000000 0 4G12G09G06E11
23629347.915          .300 8          -.353          23629364.158
20891534.648          -.120 9          -.358          20891541.292
20607600.189          -.430 9          .394          20607605.848
                                         .324 8
                                         .178 7
05 3 24 13 10 50.0000000 4 4
               1             2             2             G 9            G12
*** WAVELENGTH FACTOR CHANGED FOR 2 SATELLITES ***
NOW 8 SATELLITES HAVE WL FACT 1 AND 2!
                                         WAVELENGTH FACT L1/2
                                         COMMENT
                                         COMMENT
```

Рис. 3 – Пример данных наблюдения для формата RINEX 2.1

```

-----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V2.10      AIUB          3-SEP-99 15:22      PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 2.10 FORMAT      COMMENT
.1676D-07   .2235D-07   -.1192D-06   -.1192D-06      ION ALPHA
.1208D+06   .1310D+06   -.1310D+06   -.1966D+06      ION BETA
.133179128170D-06   .107469588780D-12   552960      1025 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
13                                     LEAP SECONDS
                                     END OF HEADER
6 99 9 2 17 51 44.0 -.839701388031D-03 -.165982783074D-10 .000000000000D+00
.910000000000D+02 .934062500000D+02 .116040547840D-08 .162092304801D+00
.484101474285D-05 .626740418375D-02 .652112066746D-05 .515365489006D+04
.409904000000D+06 -.242143869400D-07 .329237003460D+00 -.596046447754D-07
.111541663136D+01 .326593750000D+03 .206958726335D+01 -.638312302555D-08
.307155651409D-09 .000000000000D+00 .102500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .910000000000D+02
.406800000000D+06 .000000000000D+00
13 99 9 2 19 0 0.0 .490025617182D-03 .204636307899D-11 .000000000000D+00
.133000000000D+03 -.963125000000D+02 .146970407622D-08 .292961152146D+01
-.498816370964D-05 .200239347760D-02 .928156077862D-05 .515328476143D+04
.414000000000D+06 -.279396772385D-07 .243031939942D+01 -.558793544769D-07
.110192796930D+01 .271187500000D+03 -.232757915425D+01 -.619632953057D-08
-.785747015231D-11 .000000000000D+00 .102500000000D+04 .000000000000D+00
.000000000000D+00 .000000000000D+00 .000000000000D+00 .389000000000D+03
.410400000000D+06 .000000000000D+00
-----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

```

Рис. 4 – Пример данных навигационного сообщения для формата RINEX 2.1

2.2 Вычисление наклонного ПЭС по групповым и фазовым измерениям

После обработки данных со станций GNSS следующим шагом являлось вычисление наклонного значения ПЭС. Вычисление значения наклонного полного электронного содержания происходило с помощью формул (8) и (11), соответственно для фазового и кодового методов.

Как упоминалось выше, из-за высокого уровня шума кодовых измерений практически невозможно выделить вариации ПЭС. Это обуславливает использование фазовых измерений для определения вариаций ПЭС, но начальное значение ПЭС остается неизвестным в силу существования фазовой неоднозначности.

Для решения этой проблемы использовались кодовые измерения, с помощью которых находилась неоднозначность фазы для фазовых измерений, так как они являются абсолютно точными до ошибки, обусловленной ДКЗ.

Измеренное значение ПЭС вычислялось по формуле:

$$I_m = I_\varphi + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_p - I_\varphi), \quad (14)$$

где I_m - измеренное значение ПЭС с устраниенной фазовой неоднозначностью, I_φ - фазовые измерения, I_p - кодовые измерения, N - число измерений.

Стоит отметить, что значения ПЭС, которые представлены на рисунке 5, уже учитывают влияние дифференциальных кодовых задержек.

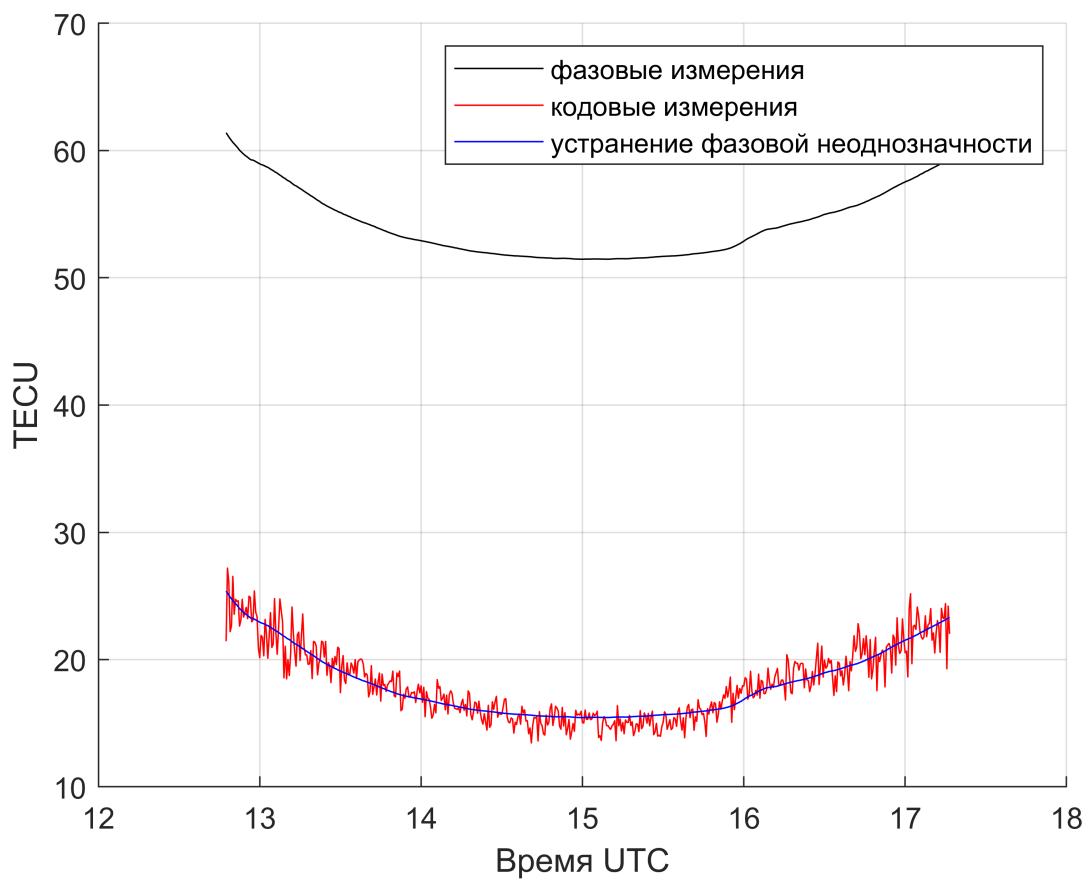


Рис. 5 – Вычисленные значения ПЭС по кодовым и фазовым измерениям с учетом фазовой неоднозначности.

2.3 Оценка вертикального значения ПЭС

Для вычисления вертикального значения полного электронного содержания была использована модель, предложенная в работе Мыльниковой А.А. [10].

Идея используемой модели заключалась в том, что рассматривается разложение измеренного значения ПЭС в ряд Тейлора:

$$I_m = \frac{1}{S} [I_v(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta\phi + G_l \Delta l + G_t \Delta t + \dots] + I_{BIAS}, \quad (15)$$

где I_m - измеренное значение наклонного ПЭС, $\Delta\phi$ - разница по широте между координатой ионосферной точки и станции ϕ_0 , Δl - разница по долготе между координатой ионосферной точки и станции l_0 , Δt - разница между временем измерения и временем, для которого осуществляется расчет t_0 , $G_\phi = \frac{\partial I_v}{\partial \phi}$, $G_l = \frac{\partial I_v}{\partial l}$, $G_t = \frac{\partial I_v}{\partial t}$ - пространственные и времененная производные, I_{BIAS} - ошибка, обусловленная ДКЗ, S - функция преобразования (12).

Для нахождения значений вертикального ПЭС была построена система уравнений. Для каждого спутника записывалось уравнение (15) во все доступные моменты времени. Неизвестными величинами являлись значение вертикального ПЭС, ДКЗ для каждого спутника, пространственные градиенты и временные производные. Расчет неизвестных осуществлялся за полные сутки для выбранных моментов времени с интервалом, позволяющим использовать окрестность выбранных времен, в которой значение вертикального ПЭС принимается неизменным.

На рисунке 6 представлены результаты восстановления абсолютного значения ПЭС по построенной системе для станции dent и их верификация по данным MADRIGAL⁵.

Видимые малые отклонения от проверочных данных связаны с тем, что координаты ионосферной точки над станцией dent не совпадали с координатами, которые предоставлял MADRIGAL, на величину не более 0.5 градусов.

Для анализа ДКЗ спутников применялось условие нулевого среднего. Дифференциальные кодовые задержки для определенного спутника определяются как:

$$I_{BIAS_SAT}^i = I_{BIAS}^i - \frac{\sum_{i=1}^N I_{BIAS}^i}{N}. \quad (16)$$

где N - число спутников, I_{BIAS}^i - полученное значение ДКЗ из системы уравнений для i -го спутника.

⁵MADRIGAL - научная база данных о верхних слоях атмосферы.

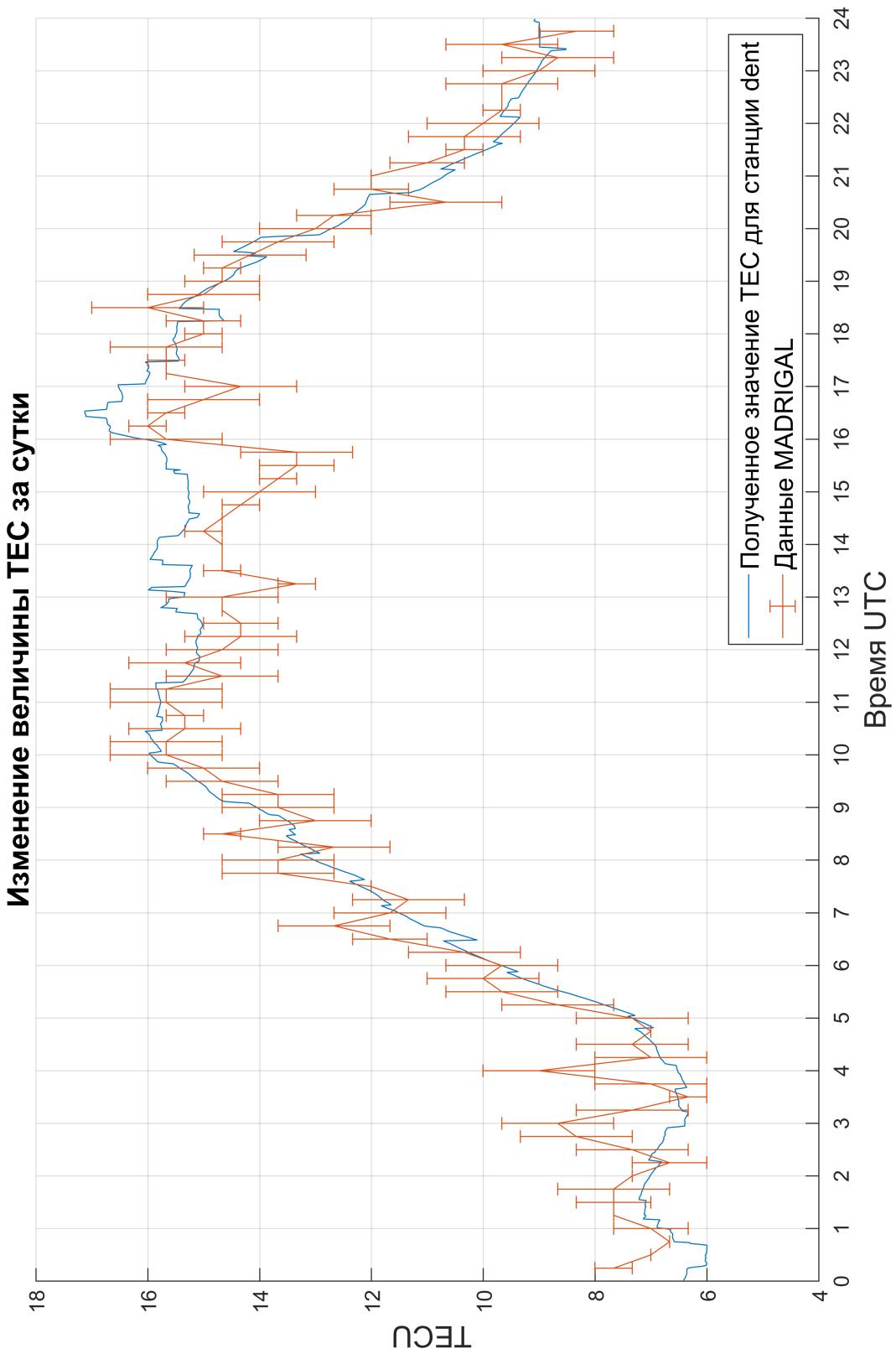


Рис. 6 – Значение вертикального ПЭС, полученное решением системы уравнений.

2.4 Нахождение пространственных и временных зависимостей измерения ПЭС

В рамках данной работы было исследовано поведение ионосферы во время солнечной вспышки 10 сентября 2017 года. Данная вспышка была класса X8.2. Выброс произошел в районе 16 часов по UTC.

Для анализа влияния солнечной вспышки на ПЭС были выбраны станции, которые в момент вспышки находились на освещенной стороне Земли. Данные брались из открытых источников, а именно с сайта EUREF⁶.

Влияние солнечной вспышки было оценено сравнением значения вычисленного ПЭС с изменением зенитного угла Солнца (Рисунок 7).



Рис. 7 – Зависимость полного электронного содержания от значения зенитного угла Солнца для станции dent 10 сентября 2017 года (координаты: 50.93, 3.39)

Данный график демонстрирует, что в начале дня значение полного электронного содержания изменялось пропорционально значению зенитного угла Солнца.

Для исследования пространственно-временных распределений полного электронного содержания во время вспышки были построены и проанализированы значения аб-

⁶Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe.

солнечного ПЭС для ряда станций, которые находились в различных местах Европы (Рисунок 8).

Для каждой из станций, с помощью описанного выше метода, было вычислено значение полного электронного содержания и его вариаций. На рисунке 9 показаны значения временной производной ПЭС для некоторых станций во время солнечной вспышки.

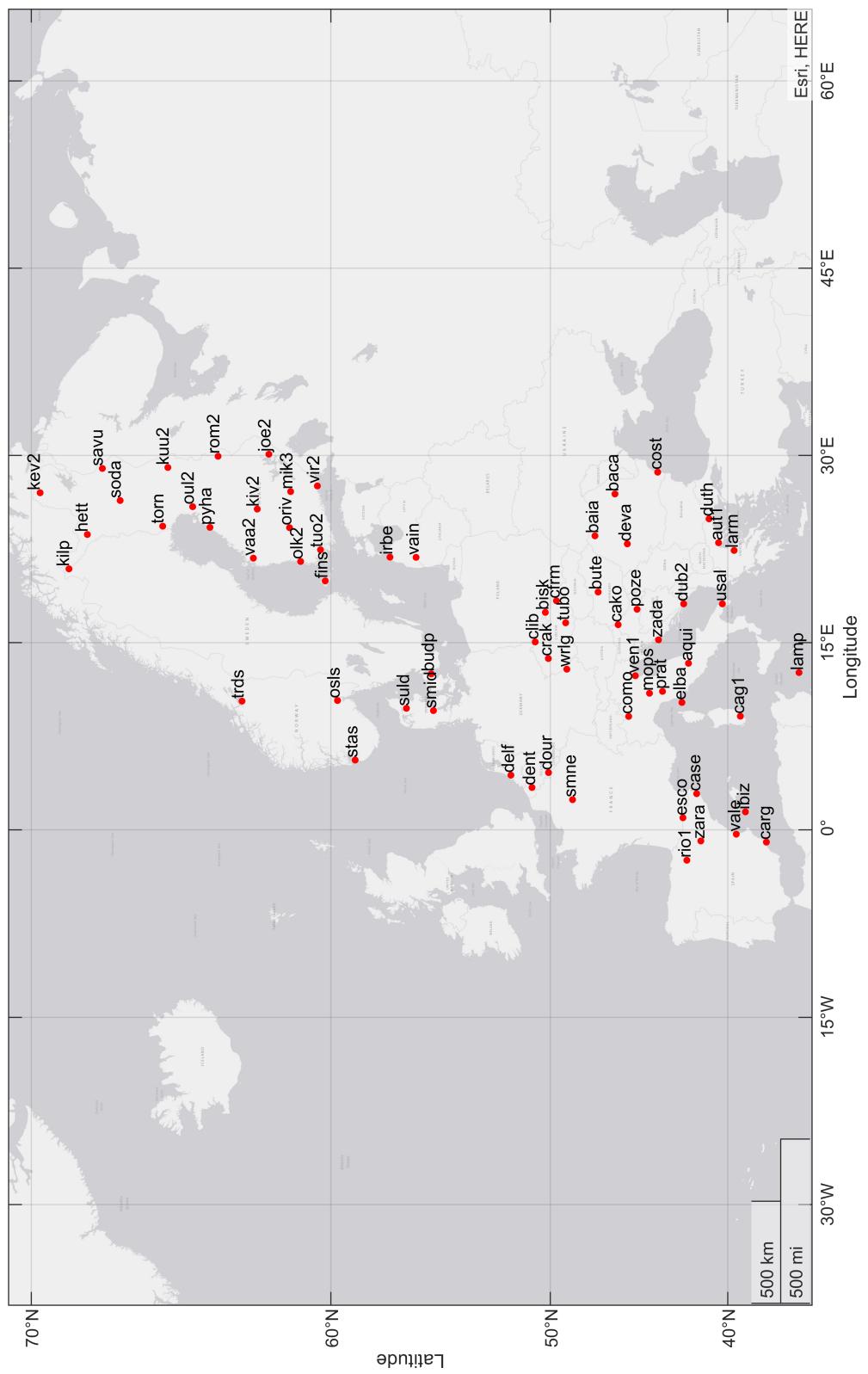


Рис. 8 – Расположение выбранных станций.

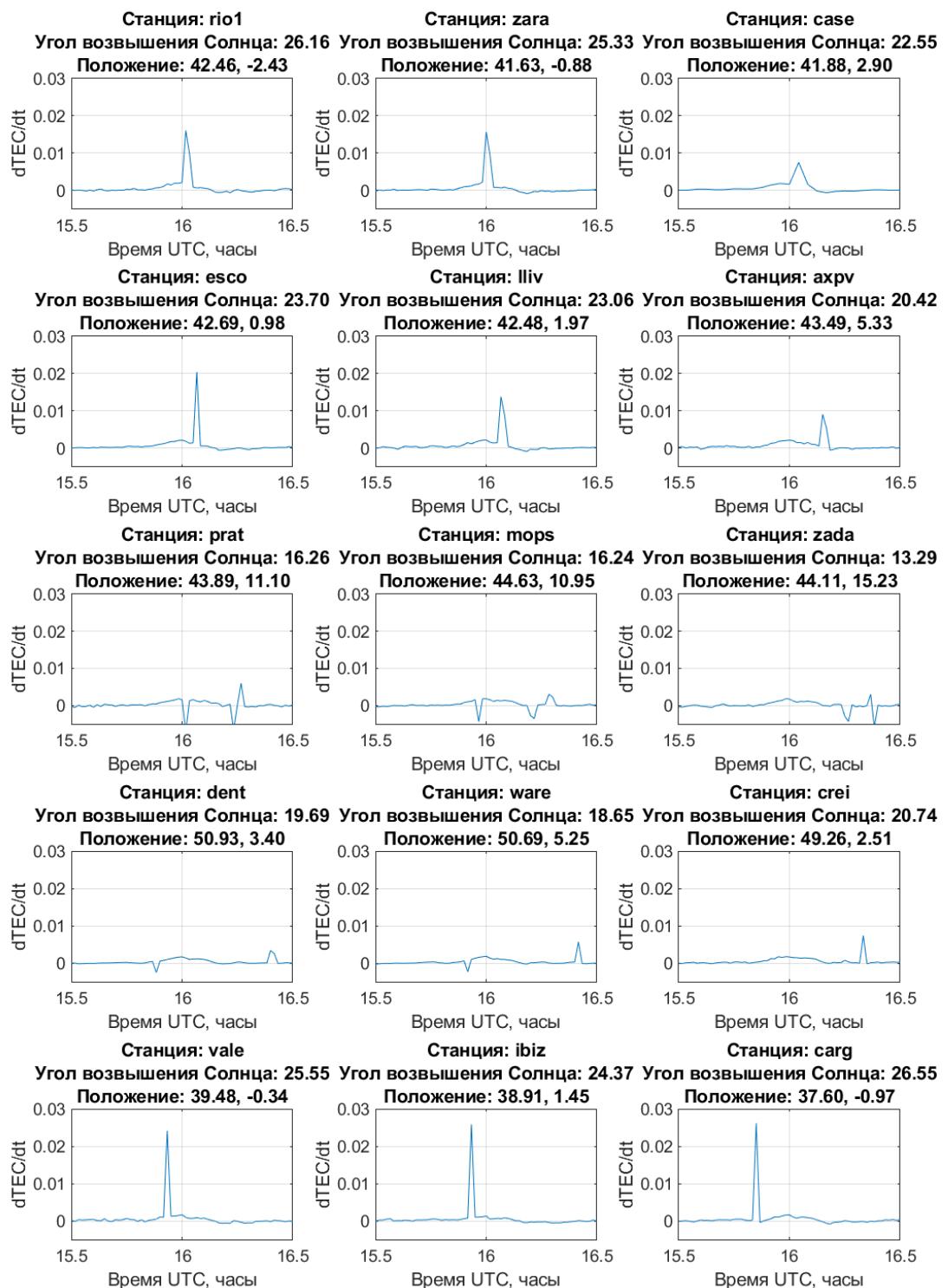


Рис. 9 – Зависимость временной производной ПЭС во время солнечной вспышки для станций с различным зенитным углом Солнца.

На рисунке 10 приведены пиковые значения временной производной полного электронного содержания в зависимости от угла элевации Солнца для всех выбранных станций в период с 15:30 до 16:30.

Полученные значения производных зависели от зенитного угла Солнца. Это можно объяснить следующим: чем выше находилось Солнце, тем более сильно была освещена данная территория, и влияние вспышки имело наибольшее воздействие на состояние ионосферы. Стоит отметить, зависимость пикового значения временной производной от угла возвышения Солнца была нелинейной. Вероятно, это связано с экспоненциальным законом изменения плотности воздуха в ионосфере, что приводит к нелинейности из-за разной траектории ионизации для станций с различным зенитным углом Солнца. Подтверждение или опровержение этой теории является одним из основных предметов дальнейших исследований.

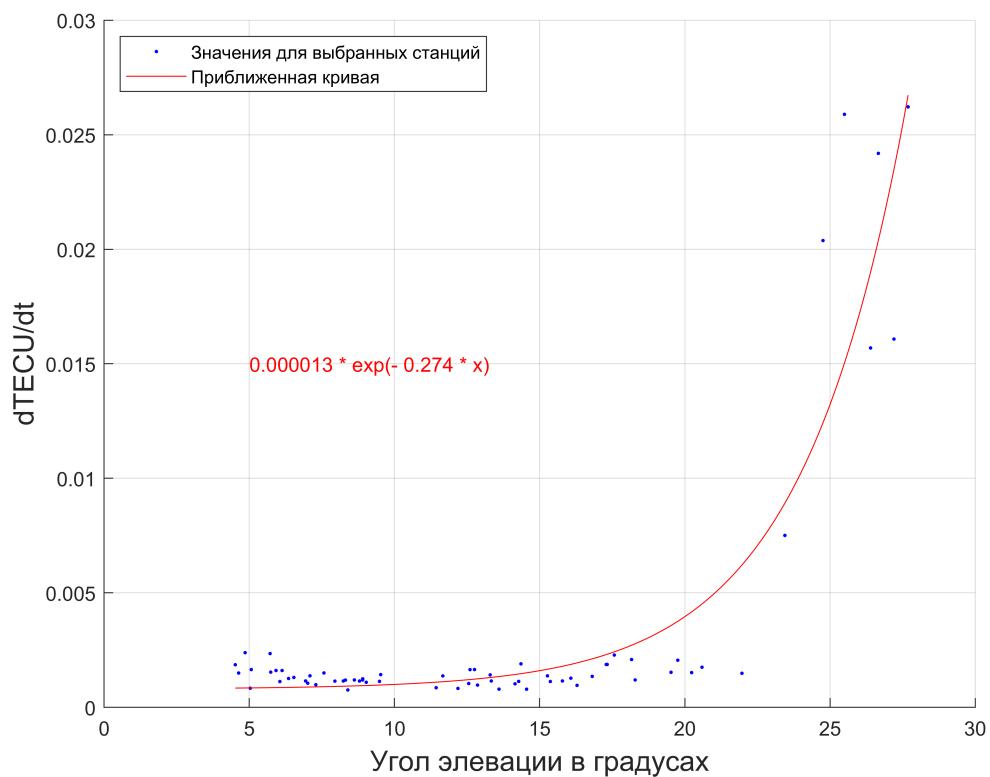


Рис. 10 – Зависимость пикового значения временной производной ПЭС от угла элевации Солнца во время солнечной вспышки.

Для рассмотрения пространственного распределения воздействия солнечной вспышки на вариацию ПЭС были выбраны ряды станций, для которых изменения координаты широты (долготы) были значительны в сравнении с координатами долготы (широты). Выбранные станции для рассмотрения широтного и долготного распределений пикового значения вариации ПЭС представлены на рисунках 11 и 13 соответственно.

2.4.1 Распределение вариации ПЭС по широте

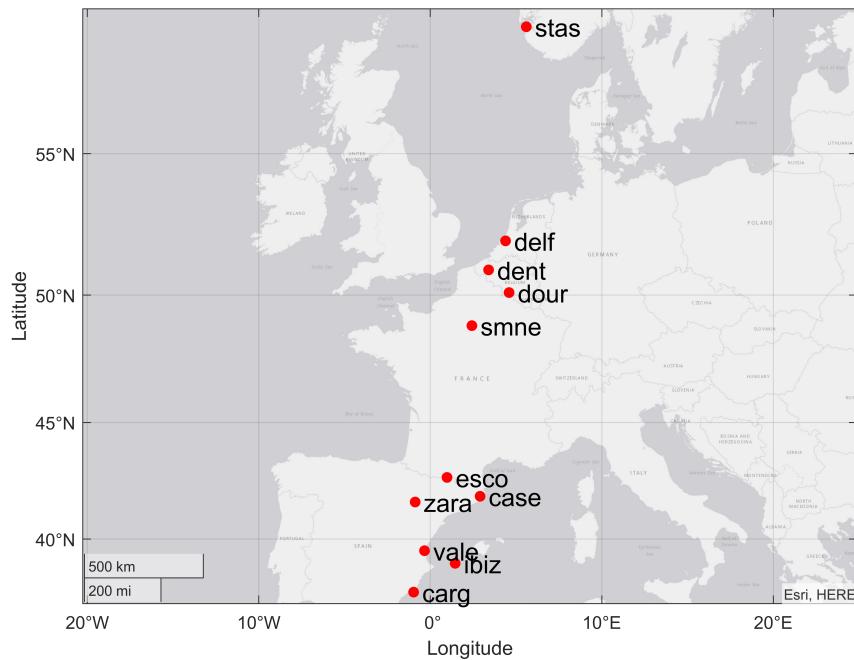


Рис. 11 – Выбранные станции для рассмотрения зависимости от изменения координаты широты.

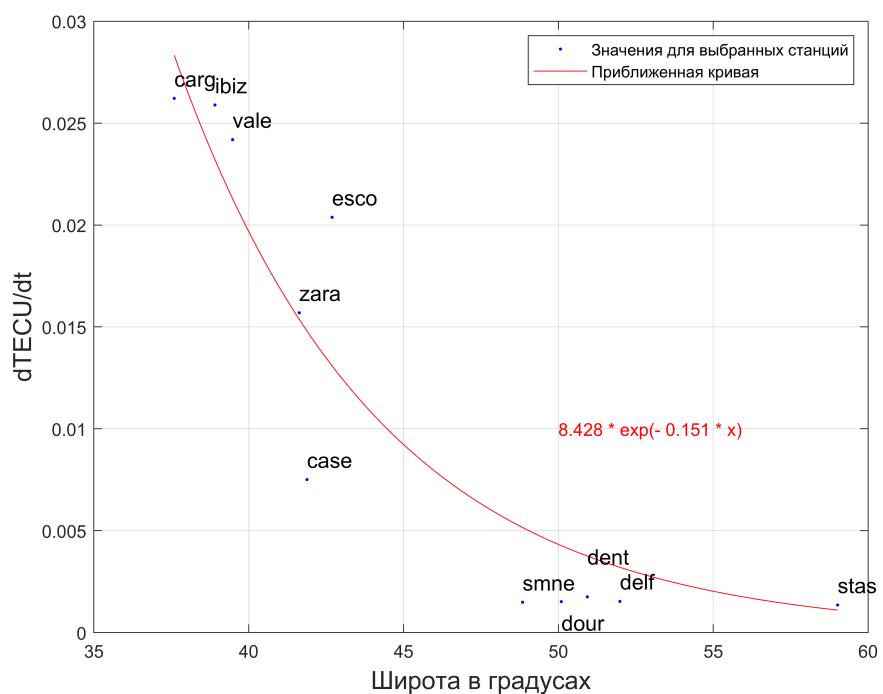


Рис. 12 – Зависимость пикового значения временной производной от изменения координаты широты.

На рисунке 12 представлена зависимость временной производной полного электронного содержания от изменения координаты широты.

Данное распределение показывает, что отклик абсолютного полного электронного содержания на солнечную вспышку был более выражен для станций, находящихся ближе к экватору. Это связано с тем, что для южных станций значение зенитного угла Солнца имело достаточно большое значение. Как было получено ранее (рисунок 10), при значениях угла элевации Солнца больше, чем 23 градуса, наблюдался резкий рост пикового значения временной производной ПЭС, этот эффект прослеживается при рассмотрении широтного распределения.

2.4.2 Распределение вариации ПЭС по долготе

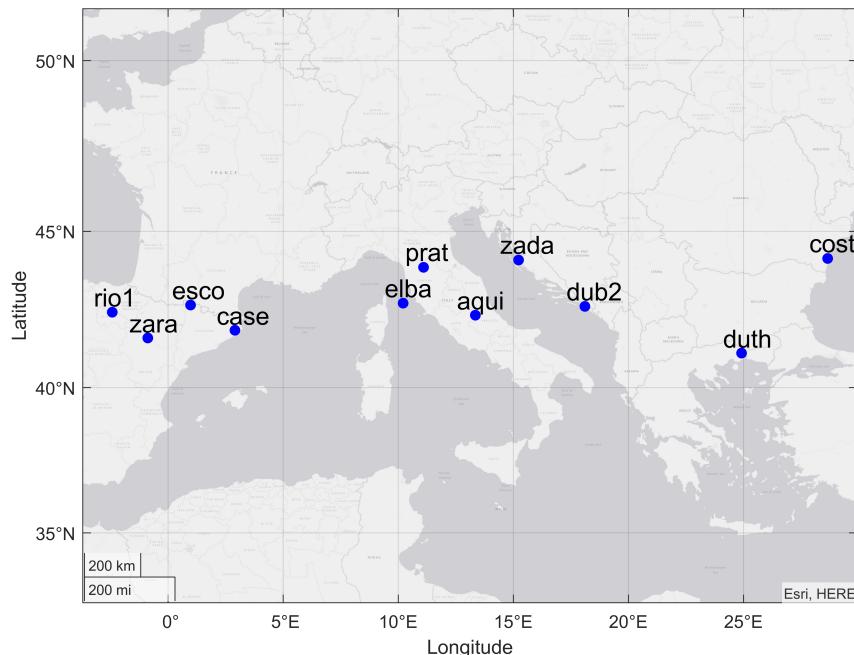


Рис. 13 – Выбранные станции для рассмотрения зависимости от изменения координаты долготы.

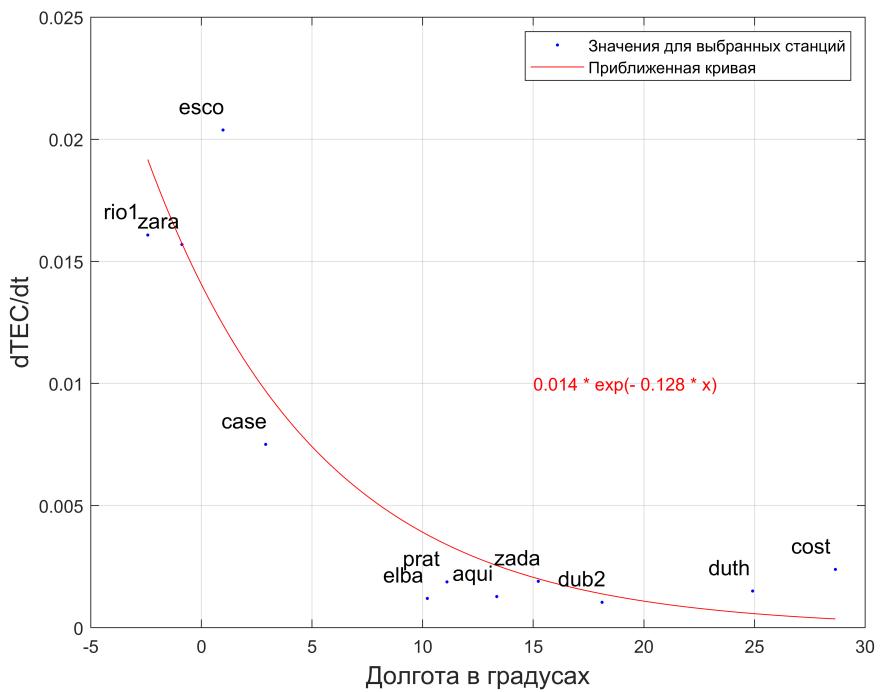


Рис. 14 – Зависимость пикового значения временной производной от изменения координаты долготы.

На рисунке 14 представлено распределение вариации полного электронного содержания в зависимости от долготы для выбранных станций (рисунок 13).

Полученная зависимость показала увеличение величины возмущения ПЭС для западных станций. В рассматриваемое время суток (16 часов по UTC) для данной территории зенитный угол Солнца являлся наибольшим для станций, находящихся в западной части Европы. Можно заметить, что по аналогии с широтным распределением наблюдался резкий рост пикового значения временной производной ПЭС в случае распределения в зависимости от координаты долготы, а именно нелинейный закон изменения величины производной.

3 Заключение

В ходе выполнения работы: был освоен алгоритм расчета абсолютного значения ПЭС, а также пространственно-временных градиентов ПЭС первого и второго порядка по данным приемника ГНСС, расположенного в ГФО "Михнево"; была проведена верификация полученных результатов с данными мировых сетей, которая свидетельствует о том, что данный метод можно считать достоверным; также было рассмотрено влияние солнечной вспышки X класса на состояние ионосферы.

В процессе данного исследования был обработан и проанализирован огромный массив данных с наземных приемников ГНСС, расположенных на освещенной стороне Земли, во время вспышки . Этот анализ позволил оценить пространственно-временное распределение ПЭС в момент солнечной вспышки X8.2 (10 сентября 2017 года). В результате удалось обнаружить, что в момент солнечной вспышки рост пикового значения производной ПЭС зависел от зенитного угла Солнца по нелинейному закону, который может быть связан с экспоненциальным изменением плотности атмосферы.

В данной работе была построена зависимость ПЭС для станций, распределенных по широте и долготе. При рассмотрении зависимости распределения вариации ПЭС от координат широты и долготы отклик ПЭС на солнечную вспышку был более выражен для западных экваториальных станций. Это можно объяснить тем, что в рассматриваемое время суток для данной территории зенитный угол Солнца являлся наибольшим.

Список литературы

- [1] GPSgov. Space Segment. 2020. URL: www.gps.gov/systems/gps/space/.
- [2] Collins J. Hofmann-Wellenhof B. Lichtenegger H. Global Positioning System: Theory and Practice. 1992.
- [3] Шебшаевич В.М. и др. Дифференциальный режим сетевой спутниковой радионавигационной системы. 1989.
- [4] Перевалова Н.П. Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. 2006.
- [5] Котяшкин С.И. Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей спутниковой системы навигации. 1989.
- [6] Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. 1973.
- [7] Ратклифф Дж.А. Магнитно-ионная теория и ее приложения к ионосфере. 1962.
- [8] Кожарин М.А. Куницын В.Е. Детектирование и исследование временного развития крупных ионосферных структур с помощью данных навигационных спутников систем GPS/ГЛОНАСС. 2004.
- [9] Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. 1986.
- [10] Мыльникова А.А. Восстановление абсолютного значения, пространственных градиентов и временной производной полного электронного содержания по данным GPS/ГЛОНАСС. 2017.