

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**

**Полученные результаты**

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>5</b>
<b>1 Теоретические сведения</b>	<b>6</b>
1.1 Использование GPS в исследовании ионосферы . . . . .	6
1.2 Общие сведения о GPS . . . . .	6
1.3 Интересующие виды измерений в GPS . . . . .	7
1.4 Геометрические положения, используемые для GPS зондирования	10
1.5 Принципы расчета ПЭС по данным GPS приемников . . . . .	12
1.5.1 Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевдодальности . . . . .	12
1.5.2 Определение ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности . . . . .	13
1.5.3 Преобразование наклонного ПЭС в вертикальное . . . . .	14

## Используемые обозначения

# 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

Основные параметры, характеризующие ионосферу: локальная электронная концентрация  $N_e$ , температура ионов и электронов и полное электронное содержание.

Объектом исследования данной работы является полное электронное содержание (ПЭС или ТЕС в англоязычной литературе). ПЭС представляет собой количество электронов в столбе единичного сечения. В рамках данной работы предлагается получение пространственно-временного распределения полного электронного содержания во время высокой солнечной активности.

## Значимость исследования

# 1 Теоретические сведения

## 1.1 Использование GPS в исследовании ионосферы

Существует множество различных методов, применяемых для исследования состояния ионосферы, такие как вертикальное, наклонное, вертикально-наклонное, внешнее зондирования, некогерентное рассеяние и многие другие. Появление глобальной навигационной системы и создание огромной сети GPS станций стали началом новой эры дистанционного исследования ионосферы. Большое количество станций и непрерывная доступность спутников позволяют производить своевременный 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 так же 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)<sup>1</sup>, 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

---

<sup>1</sup>на момент Февраля 2019 года [1]

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.

### 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;  $\tau_R$  - отклонение часов приемника от системного времени GPS;  $\sigma_D$  - 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  $\tau_R$ . 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.**  $D' = c\tau$ . 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 C/A-кода на частоте  $f_1$  и по P-коду на частотах  $f_1$  и  $f_2$ <sup>2</sup>. Точность определения псевдодальности по кодовым измерениям составляет 1% от длины кода, что позволяет делать измерение по C/A-коду с погрешностью в 3 метра, а по P-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;

---

<sup>2</sup>измерение по C/A-коду обозначается как  $C1$ , а для P-кода соответственно  $P1$  и  $P2$



$\lambda = c/f$  – 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.

**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)<sup>3</sup>. На данный коэффициент умножаются все другие ошиб-

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

ки.

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 DGPS<sup>4</sup>.

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.

## 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».

Для вычисления координат  $\alpha_S$ ,  $\theta_S$ , которые являются, соответственно, азимутом и углом места (элевация), 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]:

---

<sup>4</sup>суть 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.

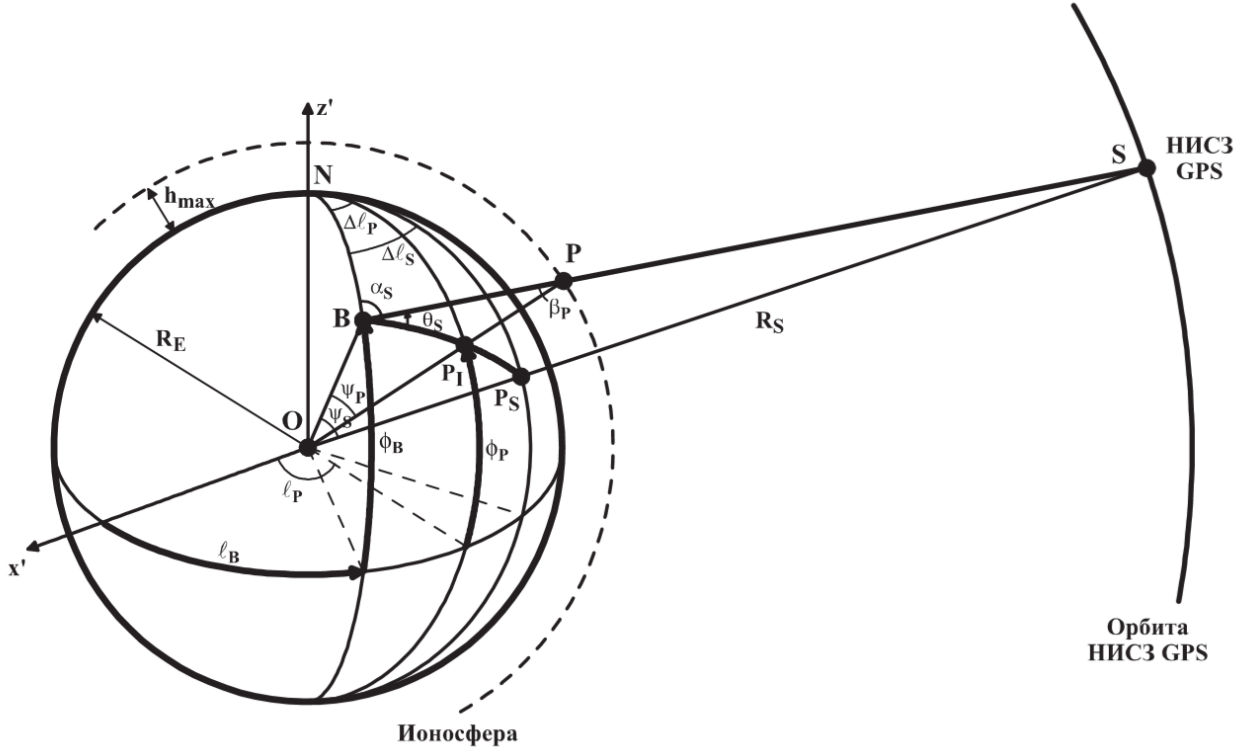


Рис. 1: Геометрия системы «Земля – спутник»:  $O$  – центр Земли;  $S$  – спутник;  $B$  – пункт наблюдения;  $P$  – ионосферная точка;  $P_I$  – подионосферная точка;  $P_S$  – подспутниковая точка;  $h_{\max}$  – высота максимума слоя F2 ионосферы. [4]

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

где  $R_S$  – радиус орбиты спутника;  $R_E$  – радиус Земли;  $\Phi, \Lambda$  – геодезические широта и долгота точки наблюдения;  $\Phi_S, \Lambda_S$  – геодезические широта и долгота спутника;  $\Psi_S$  – 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  $\phi_B, l_B$  – географические координаты точки наблюдения;  $\alpha_S, \theta_S$  – азимут и угол места луча «приемник – спутник»;  $\Psi_P$  – центральный угол между точкой наблюдения и ионосферной точкой;  $\phi_P, l_P$  – широта и долгота ионосферной точки

## 1.5 Принципы расчета ПЭС по данным GPS приемников

### 1.5.1 Определение ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям псевдодальности

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

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

где  $f_1, f_2$  – рабочие частоты GPS;  $\varphi_{1,2}$  – набег фазы для частот  $f_1, f_2$ ;  $\varphi_0$  – 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]:

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

где  $N_e$  – локальная электронная концентрация.

Тогда выражение для набег 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;  $\sigma L$  – 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  $10^{14} \text{ м}^{-2}$  (или 0.01 TECU).

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

## 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  $\sigma P$  – 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 сферичной Земли, формула преобразования имеет вид [9]:

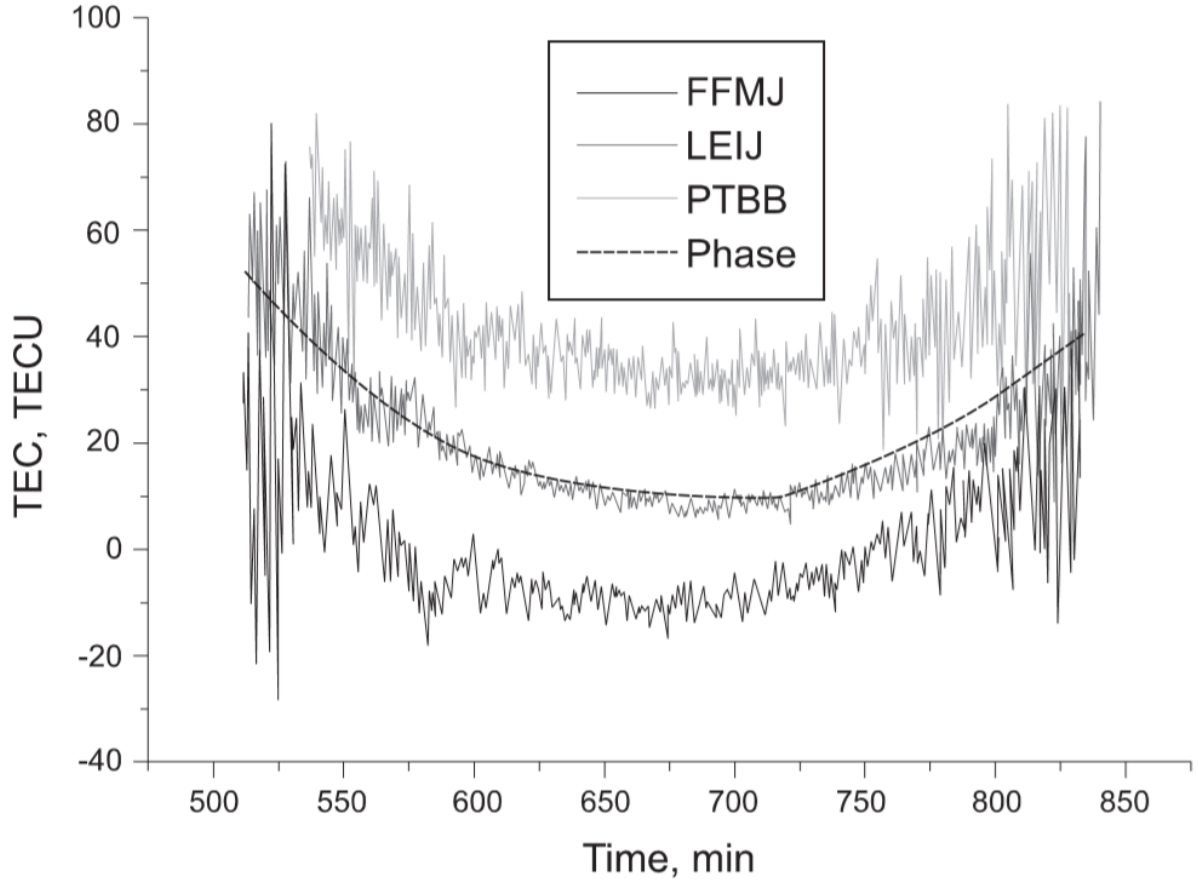


Рис. 2: Зашумленность ПЭС, вычисленного по данным измерений группового (кривые «FFMJ», «LEIJ» и «PTBB») и фазового (кривая «Phase») запаздывания сигналов GPS [8].

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

где  $I_V$  – вертикальное значение ПЭС.

## Список литературы

- [1] GPSgov. *Space Segment*. 2020. URL: [www.gps.gov/systems/gps/space/](http://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 временно-го 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.