

**Е.И. Данильчук**

*Иркутский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**В.В. Демьянов**

*Иркутский государственный университет  
путей сообщения;  
Иркутский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ СИГНАЛА НАВИГАЦИОННОГО СПУТНИКА ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕДУР ОБРАБОТКИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Аннотация.** Предложена эмпирическая модель фазы несущей сигналов навигационных спутников, предназначенная для решения методических задач отработки и тестирования методов и средств обработки фазовых измерений, полученных по измерениям сигналов ГНСС. Модель содержит регулярный фазовый набег за счет движения спутника, регулярные ионосферные рефракционные погрешности измерения фазы, связанные с многомасштабными волновыми возмущениями полного электронного содержания. Используется методика МНК-оценивания параметров модели при использовании реальных измерений волновых возмущений полного электронного содержания. Модель может быть рекомендована для отработки процедур разрешения фазовой неоднозначности, удаления тренда измерений полного электронного содержания на основе комбинации межчастотных измерений фазы.

**Ключевые слова.** Фаза несущей, ГНСС, ионосфера, ПЭС, ионосферные неоднородности.

**Информация о статье.** Дата поступления: 16 декабря 2020 г.

**E.I. Danilchuk**

*Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**V.V. Demyanov**

*Irkutsk State Transport University;  
Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

## **EMPIRICAL MODEL OF NAVIGATION SATELLITE SIGNAL CARRIER PHASE FOR METHODOLOGICAL RESEARCHES OF PHASE MEASURE PROCESSING PROCEDURES**

**Annotation.** We proposed the empirical model of the carrier phase of navigation satellite signals for solving methodological problems of working out and testing methods of processing phase measurements obtained from measurements of GNSS signals. The model contains regular phase incursion due to satellite motion, regular ionospheric refractive errors of phase measurement associated with multiscale wave disturbances of total electron content. The authors used the method of least squares to estimate a model of parameters using real measurements of wave disturbances of total electron content. The model can be recommended to resolve

phase ambiguity, removing the trend of total electronic content measurements based on a combination of inter-frequency phase measurements.

**Keywords.** Carrier phase, GNSS, ionosphere, TEC, ionospheric disturbances.

**Article info.** Received 16 December 2020.

Глобальные навигационные спутниковые системы в настоящее время являются весьма важным и распространенным инструментом, как для решения прикладных задач, так и для проведения геофизических исследований среды околоземного космического пространства (ОКП) [1–5]. Фаза несущей сигналов навигационных спутников является важнейшим радионавигационным параметром, который используется для решения задач высокоточной навигации подвижных и стационарных объектов. С другой стороны, фаза трансионосферного сигнала обладает самой высокой потенциальной точностью для проведения многомасштабных возмущений среды ОКП. Так, использование комбинированных измерений фазы на двух и более частотах позволяет обнаруживать возмущения полного электронного содержания в ионосфере с амплитудой порядка  $10^{-4}$  TECU [1]. Учитывая, что измерение фазы сигналов навигационных спутников доступно непрерывно практически в любой точке Земли, а также в ближайшем ОКП, использование этих измерений открывает очень большие возможности для проведения высокоточных масштабных геофизических исследований ионосферы и верхней атмосферы Земли.

В то же время, обработка измерений фазы имеет ряд существенных трудностей, таких, как:

1. Неоднозначность фазовых измерений.
2. Наличие скачков в измерении фазы при кратковременных срывах ее сопровождения в навигационном приемнике (цикл-слипы).
3. Наличие периодических скачков в измерении фазы, вызванных подстройкой опорного генератора приемника и спутника при коррекции бортовых шкал времени (ступеньки фазы) [6].
4. Нестационарные вариации фазы, вызванные локальными шумами многолучевости, электромагнитными помехами и квазирегулярным федингом уровня сигнала в точке приема по этим и другим причинам [7].

Существует множество методов, которые позволяют обеспечить обработку измерений фазы, разрешение фазовой неоднозначности и удаление цикл-слипов и периодических ступенек в измерениях. Однако большинство этих методов достаточно сложны в использовании и имеют узкоспециальное применение. Кроме этого, качество и особенности поведения измерений фазы существенно зависят от поколения спутников, типа навигационного приемника, а также местных условий измерений. Корректно учесть все эти факторы в рамках некой «унифицированной» процедуры обработки фазы, не представляется возможным. Таким образом, потребность в разработке при-

кладных процедур обработки фазы несущей сигналов навигационных спутников под конкретные условия и задачи экспериментального или прикладного направления всегда сохраняет свою актуальность.

Целью данной работы является разработка методической модели фазы несущей сигналов навигационных спутников, которая учитывает набег фазы за счет движения спутника, рефракционное фазовое опережение в регулярной ионосфере и рефракционные волновые вариации фазы, вызванные многомасштабными волновыми возмущениями полного электронного содержания (ПЭС).

## 1. Модель фазы несущей

В данной работе рассматривалась фаза несущей сигнала на первой рабочей частоте СРНС GPS  $F_1 = 1,57525 \times 10^9$  Гц. Модель фазы несущей можно представить как:

$$\varphi_{L1} = d\varphi_{Rs} + d\varphi_0 + d\varphi_{LS} + d\varphi_{MS} + d\varphi_{SS}, \quad (1)$$

где  $d\varphi_{Rs}$  — регулярный ход фазы за счет движения спутника,  $d\varphi_0$  — рефракционное фазовое приращение за счет ионосферы,  $d\varphi_{LS}$ ,  $d\varphi_{MS}$ ,  $d\varphi_{SS}$  — волновые возмущения ПЭС различного масштаба (LS — крупномасштабные, MS — среднемасштабные, MM — мелкомасштабные).

На данном этапе работы рассматриваются модели регулярного хода фазы за счет движения спутника и рефракционного фазового приращения за счет ионосферы, а также модель рефракционных возмущений фазы, отнесенная к волновым возмущениям ПЭС различного масштаба. Для моделирования хода фазы несущей сигналов навигационных спутников использовались 50 Гц измерения углов возвышения и азимута спутника GPS PRN06 за 22 июня 2015 г.

### 1.1. Модель регулярного хода фазы за счет движения спутника и рефракционного приращения фазы за счет ионосферы

Регулярный ход фазы несущей связан с видимым движением спутника [8]. Радиус орбит спутника меняется по закону:

$$Rs = \sqrt{(Rz + hs)^2 - Rz^2 \cos(Gm)^2} - Rz \times \sin(Gm) \quad (2)$$

где  $Rs$  — радиус-вектор от точки местоположения приемника, до местоположения спутника на орбите,  $Rz = 6,371 \times 10^6$  м — радиус Земли,  $hs = 1,91 \times 10^7$  м — высота спутника над поверхностью Земли,  $Gm$  — угол места спутника.

Фазовый набег с учетом геометрической дальности спутника, представленной радиус-вектором [8], рассчитывается по формуле:

$$d\varphi_{Rs} = 2\pi \times F_1 \times \frac{Rs}{c}, \quad (3)$$

где  $F_1 = 1,57525 \times 10^9$  Гц — первая частота СРНС GPS,  $c = 2,997925 \times 10^8$  м/с — скорость света.

На рис. 1 представлен регулярный фазовый набег за счет движения спутника, полученный с использованием выражения (3).

Модель Клобучара [9] используется, чтобы моделировать регулярный ход ПЭС, и соответствующее рефракционное приращение фазы в регулярном ионосферном слое с учетом угла возвышения спутника и сезонно-суточных изменений ПЭС. Непосредственно модель Клобучара позволяет оценить рефракционное запаздывание сигнала в ионосфере, величина которого пропорциональна величине ПЭС вдоль луча визирования спутника:

$$T_{ion} = \begin{cases} F \times \left( 5 \times 10^9 + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \times \phi_m^n \times \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right), & \text{если } |x| < 1,57, \\ F \times 5 \times 10^9, & \text{если } |x| \geq 1,57 \end{cases} \quad (4)$$

где  $x = \frac{2\pi \times (t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \times \phi_m^n}$ ,  $\alpha_n, \beta_n$ , — коэффициенты модели Клобучара.

Для расчета ионосферной задержки рассчитываются следующие значения:

1)  $\psi = \frac{0,0137}{E + 0,11} - 0,022$  — центрированный угол Земли,  $E$  — угол места;

$$2) \phi_l = \begin{cases} \phi_u + \psi \times \cos A, & \text{если } |\phi_u + \psi \times \cos A| \leq 0,416 \\ 0,416, & \text{если } |\phi_u + \psi \times \cos A| > 0,416 \\ -0,416, & \text{если } |\phi_u + \psi \times \cos A| < -0,416 \end{cases} \quad \text{— субио-}$$

носферная широта,  $\phi_u$  — географическая широта,  $A$  — азимут;

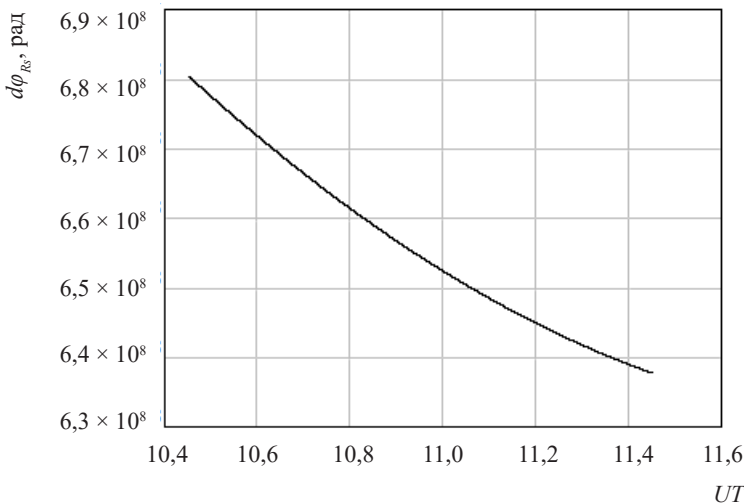


Рис. 1. Регулярный ход фазы за счет движения спутника

- 3)  $\varphi_m = \varphi_1 + 0,064 \times \cos(\lambda_1 - 1,617)$  — магнитная широта;
- 4)  $\lambda_1 = \lambda_u + \frac{\psi \times \sin A}{\cos \phi_1}$  — субионосферная долгота,  $\lambda_u$  — географическая долгота;
- 5)  $t = \begin{cases} LT \times 3600, & \text{если } 0 \leq LT \times 3600 < 86400 \\ LT \times 3600 - 86400, & \text{если } LT \times 3600 \geq 86400 \\ LT \times 3600 + 86400, & \text{если } LT \times 3600 < 0 \end{cases}$  — местное время в секундах;
- 6)  $F = 1,0 + 16,0 \times (0,53 - E)^3$  — фактор наклона.

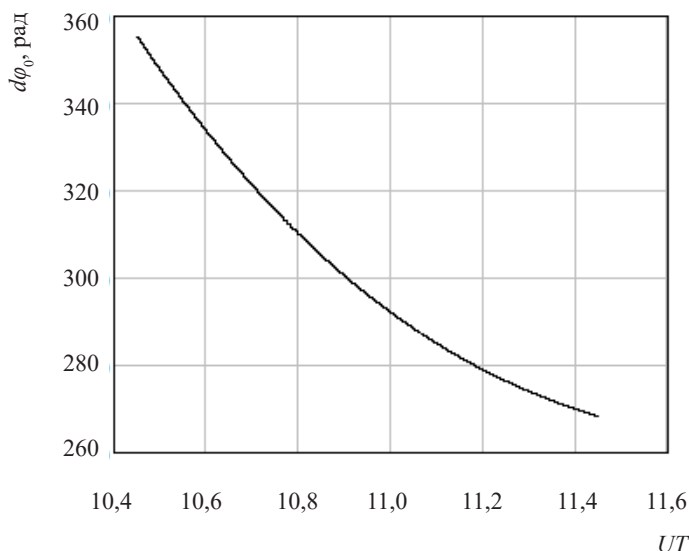
Пересчитаем ионосферную временную задержку в рефракционное фазовое опережение по формуле:

$$d\varphi_0 = \frac{2\pi \times F_1}{c} \times \left( T_{ion} \times c \times \frac{1}{\lambda} \right). \quad (5)$$

Ход фазового приращения, пропорционального величине ПЭС вдоль линии визирования спутника для спутника GPS PRN 06 представлен на рис. 2.

### 1.2. Модель волновых рефракционных вариаций фазы

Ионосфера является сложной динамической средой, состояние которой определяется многими факторами, например, интенсивностью солнечной активности, временем суток, сезоном, широтой и долготой [1; 10; 11]. Характерной особенностью ионос-



**Рис. 2. Рефракционное фазовое приращение в регулярном ионосферном слое**

феры является ее изменчивость и неоднородность. Наличие неоднородных структур в ионосфере является ее обычным состоянием, а поэтому исследование структуры ионосферных неоднородностей является важной задачей верхней атмосферы [1].

К ионосферным возмущениям относят отклонение ионосферных параметров от их спокойного суточного хода. Возмущения проявляются в вариациях локальной электронной концентрации, температуры ионов и электронов, полного электрического содержания (ПЭС) [1; 12].

Ионосферные возмущения классифицируют на основе их пространственно-временных масштабов, степени изменения электронной концентрации и скорости перемещения. Характеристики ионосферных возмущений определяются параметрами источника этих возмущений. Выделяют основные типы ионосферных возмущений: крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (КМ ПИВ), среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (СМ ПИВ), мелкомасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ММ ПИВ), ионосферные возмущения промежуточного масштаба (ПМ ИВ), ударно-акустические волны (УАВ), внезапные ионосферные возмущения (ВИВ) [1].

КМ ПИВ генерируются в результате мощных магнитных бурь в авроральных зонах в северном и южном полушариях. КМ ПИВ являются ионосферным проявлением внутренних атмосферных акустико-гравитационных волн с временными периодом порядка 1 ч и длиной волны свыше 1 000 км. Данные возмущения в основном перемещаются в экваториальном направлении со скоростью 300–1 000 м/с [1].

СМ ПИВ являются довольно распространенным типом ПИВ. СМ ПИВ возникают при различных возмущениях нейтральной атмосферы: погодные явления, землетрясения и т.д. СМ ПИВ могут распространяться в различных направлениях с длиной волны в пределах 50–500 км и периодом 20–60 мин. К СМ ПИВ относятся особые виды ионосферных возмущений: перемещающиеся волновые пакеты, изолированные ионосферные неоднородности [1].

ПМ ПИВ и ММ ПИВ достаточно близки по характеристикам и возникают вследствие погодной изменчивости. Период данных возмущений находится в интервале от 1 до 10 мин., а пространственный масштаб составляет 100–1 000 м. ПМ ПИВ вызывает F-рассеяние, а ММ ПИВ искажение радиоимпульсов, амплитудные мерцания радиосигналов [1].

В таблице представлены основные характеристики КМ ПИВ, СМ ПИВ и ММ ПИВ.

КМ ПИВ можно описать как суперпозицию нескольких гармонических волн с достаточно близкими частотами:

### Основные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений

Тип ПИВ	Временной масштаб, мин.	Горизонтальный пространственный масштаб, км	Скорость распространения, м/с	Длина волны, км
КМ ПИВ	~60	600–1200	300–1 000	более 1 000
СМ ПИВ	20–60	50–600	100–300	50–500
ММ ПИВ	1–10	0,1–1	–	менее 50

$$d\varphi_{Ls} = A_1 \cos(\omega_1 \times t - \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 \times t - \varphi_2) + A_3 \cos(\omega_3 \times t - \varphi_3), \quad (6)$$

где  $A_i$  — относительная амплитуда волны с учетом регулярного хода ионосферы;  $\omega_i = 2\pi \times f_i = 2\pi \times \frac{V_i}{\lambda_i}$  — циклическая частота волны;  $V_i$  — скорость распространения волны;  $\lambda_i$  — длина волны;  $\varphi_i$  — начальная фаза волны.

СМ ПИВ также можно задать как суперпозицию нескольких гармонических колебаний, но ограниченных во времени:

$$d\varphi_{MS} = A_1 \times \frac{\cos(\omega_1 \times t - \varphi_1)}{\omega_1 \times t - \varphi_1} + A_2 \times \frac{\cos(\omega_2 \times t - \varphi_2)}{\omega_2 \times t - \varphi_2} + A_3 \times \frac{\cos(\omega_3 \times t - \varphi_3)}{\omega_3 \times t - \varphi_3} \quad (7)$$

где  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\varphi_i$  обозначают относительную амплитуду, частоту и начальную фазу волн, как и для случая КМ ПИВ.

ММ ПИВ представляют сигналы с ограниченным спектром, а также ММ ПИВ ограничены по времени. Примерами ММ ПИВ являются перемещающиеся волновые пакеты, изолированные ионосферные неоднородности и т.д. [1]. Перечисленные виды ММ ПИВ можно описать как суперпозицию нескольких сигналов с ограниченным спектром:

$$d\varphi_{SS} = \left[ \frac{S_1 \times \omega_1}{\pi} \times \frac{\sin(\omega_1 \times t - \varphi_1)}{\omega_1 \times t - \varphi_1} + \frac{S_2 \times \omega_2}{\pi} \times \frac{\sin(\omega_2 \times t - \varphi_2)}{\omega_2 \times t - \varphi_2} \right] \times \cos(\omega \times t) \quad (8)$$

где  $S_i$  — относительная амплитуда волны;  $\omega_i$  — циклическая частота волны;  $\varphi_i$  — начальная фаза волны.

При моделировании вариаций фазы, связанных с многомасштабными волновыми возмущениями ПЭС (табл.), учитывалось, что вариации фазы и пропорциональные им вариации ПЭС связаны между собой соотношением:

$$dI = d\varphi \times \frac{c \times F_1}{80,8 \times \pi} \times 10^{-16}, \quad (9)$$

где  $d\varphi$ ,  $dI$  — значения фазы несущей и возмущения ПЭС соответственно;  $c = 2,997925 \times 10^8$  м/с — скорость света;  $F_1 = 1,57525 \times 10^9$  Гц — первая частота СРНС GPS.

Параметры моделей для КМ ПИВ (6), СМ ПИВ (7) и ММ ПИВ (8) подбирались методом наименьших квадратов на основе использования известных значений возмущений ПЭС соответствующих масштабов, полученных путем экспериментальных наблюдений.

Метод наименьших квадратов (МНК) применяется для аппроксимации экспериментальных данных аналитической моделью. Суть МНК заключается в том, чтобы в качестве оценок взять такие значения параметров модели, при которых сумма квадратов ошибок прогноза будет минимальной:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - P(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $\varepsilon_i$  — отклонения модели от истинных значений,  $y_i$  — экспериментальные значения,  $P(x_i)$  — аналитическая модель, параметры которой необходимо оценить [13].

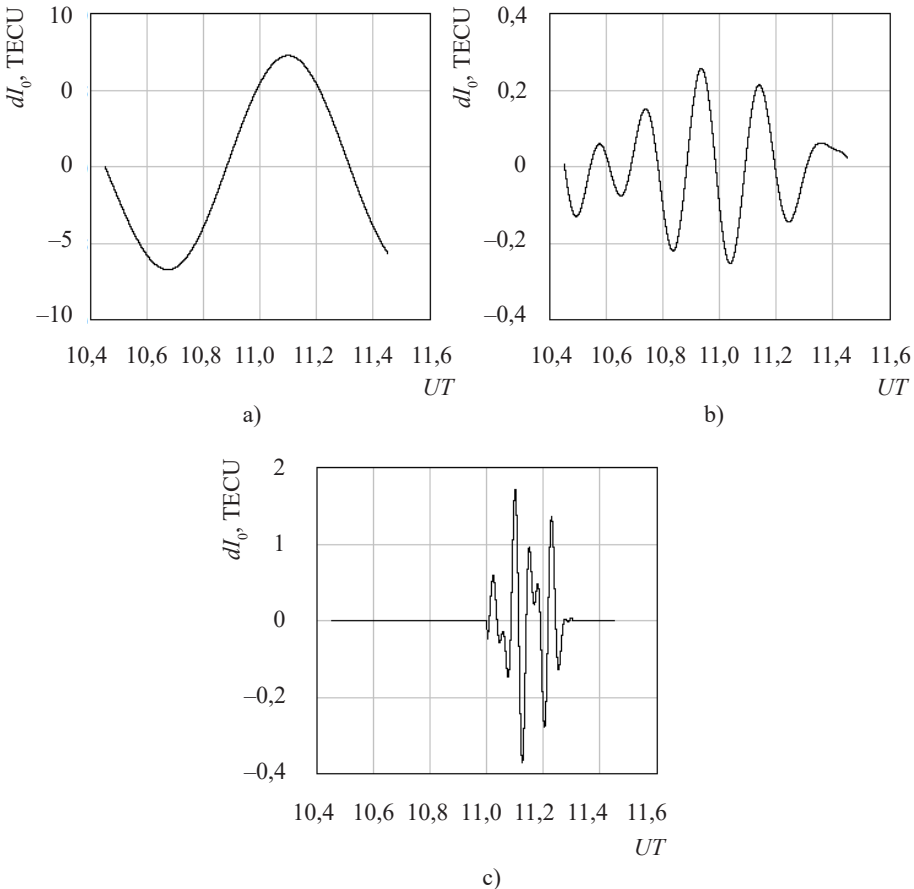
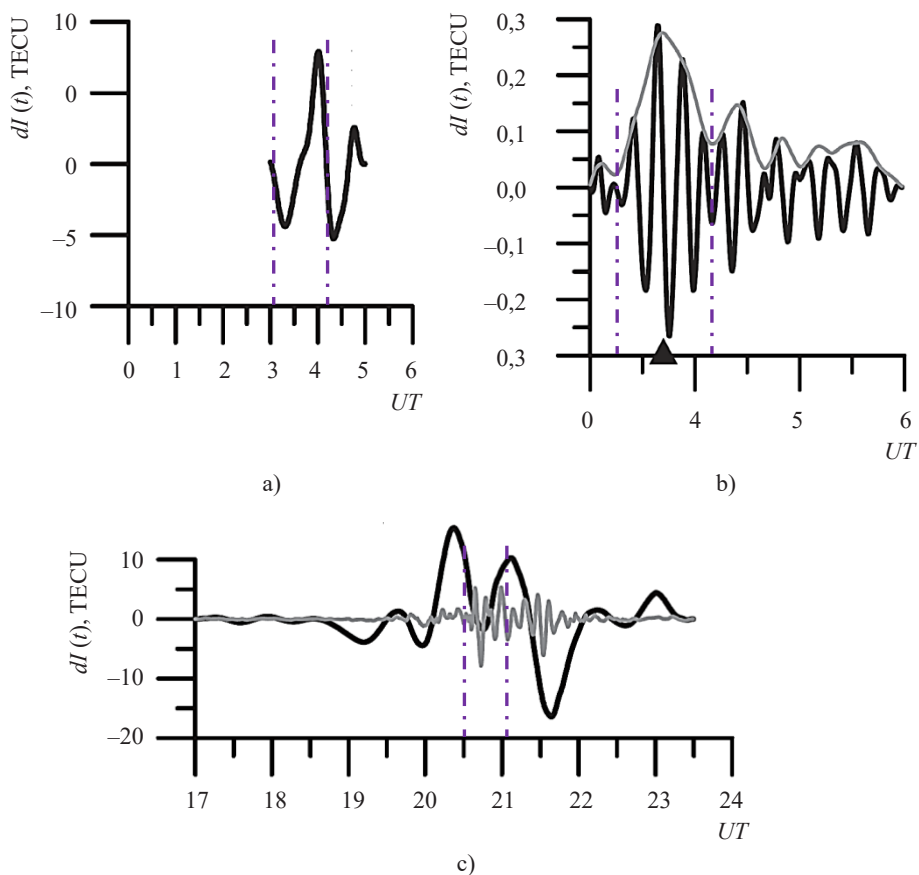


Рис. 3. Моделирование КМ ПИВ (а), СМ ПИВ (б) и ММ ПИВ (с)





**Рис. 4. Реальные наблюдения возмущений ПЭС крупномасштабные (а), среднемасштабные (б, черная кривая) и мелкомасштабные (с, серая кривая)**

На рис. 3 представлены результаты моделирования КМ ПИВ (а), СМ ПИВ (б) и ММ ПИВ (с). На рис. 4 приведены для сравнения исходные значения возмущений ПЭС этих же временных масштабов. Вертикальными штрихпунктирными линиями на рис. 4 обозначены интервалы сравнения модельных и реальных данных. Критериями сравнения являлись минимальные среднеквадратичные отклонения между модельными данными и реальными измерениями. Из сравнения графиков видно, что используемые аналитические модели волновых рефракционных вариаций фазы хорошо согласуются с реальными значениями возмущений ПЭС.

### Заключение

В результате выполнения работы был определен аналитический вид модели фазы несущей сигналов навигационных спутников, учитывающий регулярный ход фазы за счет движения спут-

ника, рефракционное фазовое опережение за счет ионосферы и рефракционные возмущения фазы, связанные с многомасштабными пространственно-временными вариациями ПЭС. Проведенное тестирование показывает, что предложенная в настоящей работе модель волновых возмущений ПЭС различного пространственно-временного масштаба согласуется с реальными наблюдениями возмущения ПЭС. Предложенная модель фазы несущей сигналов навигационных спутников может быть использована для тестирования корректной работы процедуры фильтрации фазы несущей с удалением тренда заданного порядка.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. — Иркутск : Ин-т солнечно-земной физики СО РАН, 2006. — 480 с.
2. Aarons J. Development of High Latitude Phase Fluctuations During the January 10, April 10-11, and May 15, 1997 Magnetic Storms / J. Aarons, B. J. Lin // *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*. — 1999. — Vol. 61. — P. 309–327.
3. Calais E. Detection of Ionospheric Perturbations Using Dense GPS Arrays in Southern California / E. Calais, J.S. Haase, J. B. Minster. — DOI: 10.1029/2003GL017708 // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — Vol. 30, no 12. — P. 1628.
4. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) / P.T. Jayachandran, R.B. Langley, J.W. MacDougall [et al.] // *Radio Science*. — 2009. — Vol. 44. — P. 2–11.
5. Hofmann-Wellenhof B. GNSS — Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and More / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Walse. — Wien : Springer, 2008. — 516 p.
6. Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data / G. Blewitt // *Geophysical Research Letters*. — 1990. — No. 17. — P. 199–202.
7. Demyanov V.V. GNSS High-Rate Data and the Efficiency of Ionospheric Scintillation Indices / V.V. Demyanov, M.A. Sergeeva, A.S. Yasyukevich // *Satellites Missions and Technologies for Geosciences* / ed. V.V. Demyanov, J. Becedas. — London : Intech Open Limited, 2020. — URL: <https://www.intechopen.com/books/satellites-missions-and-technologies-for-geosciences/gnss-high-rate-data-and-the-efficiency-of-ionospheric-scintillation-indices>.
8. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем / В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич. — Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. — 349 с.
9. Klobuchar J. Ionosphere Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users / J. Klobuchar // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System (AES)*. — 1986. — Vol. 23, no. 3. — P. 325–331.
10. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я.Л. Альперт. — Москва : Наука, 1972. — 563 с.
11. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. — Москва : Мир, 1973. — 502 с.
12. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. — Москва : Наука, 1988. — 528 с.
13. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. — Москва : Физматлит, 1958. — 334 с.

## REFERENCES

1. Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS Publ., 2006. 480 p.
2. Aarons J., Lin B.J. Development of High Latitude Phase Fluctuations During the January 10, April 10-11, and May 15, 1997 Magnetic Storms. *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 1999, vol. 61, pp. 309–327.
3. Calais E., Haase J.S., Minster J.B. Detection of Ionospheric Perturbations Using Dense GPS Arrays in Southern California. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, no 12, pp. 1628. DOI: 10.1029/2003GL017708.
4. Jayachandran P.T., Langley R.B., MacDougall J.W., Mushini S.C., Pokhotelov D, Hamza A.M., Mann I.R., Milling D.K., Kale Z.C., Chadwick R, Kelly T, Danskin D.W., Carrano C.S. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) // *Radio Science*. — 2009. — Vol. 44. — P. 2–11.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E. GNSS — Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and More. Wien, Springer, 2008. 516 p.
6. Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data. *Geophysical Research Letters*, 1990, no. 17, pp. 199–202.
7. Demyanov V.V., Sergeeva M.A., Yasyukevich A.S. GNSS High-Rate Data and the Efficiency of Ionospheric Scintillation Indices. In Demyanov V.V., Becedas J. (eds). *Satellites Missions and Technologies for Geosciences*. London, Intech Open Limited, 2020. Available at: <https://www.intechopen.com/books/satellites-missions-and-technologies-for-geosciences/gnss-high-rate-data-and-the-efficiency-of-ionospheric-scintillation-indices>.
8. Dem'yanov V.V., Yasyukevich Yu.V. *Mekhanizmy vozdeistviya neregulyarnykh geofizicheskikh faktorov na funktsionirovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem* [Mechanisms of Impact of Irregular Geophysical Factors on Operation of Radio Positioning Satellite Systems]. Irkutsk State University Publ., 2014. 349 p.
9. Klobuchar J. Ionosphere Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System*, 1986, vol. 23, no. 3, pp. 325–331.
10. Al'pert Ya.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln i ionosfera* [Propagation of Electromagnetic Waves and the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 563 p.
11. Davies K. *Ionospheric Radio Propagation*. London, The Institution of Engineering and Technology, 1965. 487 p. (Russ. ed.: Davies K. *Radiovolny v ionosfere*. Moscow, Mir Publ., 1973. 502 p.).
12. Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p.
13. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* [Least Squares Method and Fundamentals of Mathematical and Statistical Theory of Observation Processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1958. 334 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Данильчук Екатерина Игоревна** — аспирант, кафедра радиофизики и радиоэлектроники, физический факультет, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: danilchuk.k@mail.ru.

**Демьянов Владислав Владимирович** — доктор технических наук, профессор, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», Иркутский государственный университет путей сообщения; профессор, кафедра радиофизики и радиоэлек-

троники, физический факультет, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: sword1971@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ekaterina I. Danilchuk** — Postgraduate Student, Physics Faculty, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: danilchuk.k@mail.ru.

**Vladislav V. Demyanov** — Doctor of Engineering, Professor, Department of Automatic, Telemechanic and Telecommunication, Irkutsk State Transport University; Professor, Physics Faculty, Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: sword1971@yandex.ru.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Данильчук Е.И. Эмпирическая модель фазы несущей сигнала навигационного спутника для методических исследований процедур обработки фазовых измерений / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2021. — Т. 3, № 1. — С. 26–37.

### FOR CITATION

Danilchuk E.I., Demyanov V.V. Empirical Model of Navigation Satellite Signal Carrier Phase for Methodological Researches of Phase Measure Processing Procedures. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 26–37. (In Russian).