

## Модельная оценка точности расчета полного электронного содержания методом разнесенного приема сигналов низкоорбитальных спутников

С. М. Черняков

*Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия;*  
*e-mail: smcherniakov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>*

### Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию  
15.03.2022;

получена  
после доработки  
17.05.2022

### Ключевые слова:

ионосфера,  
полное электронное  
содержание,  
погрешность,  
разнесенный прием,  
низкоорбитальный  
спутник

Предложена методика модельной оценки погрешности полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на основе данных пространственно разнесенных приемников сигналов низкоорбитальных спутников. Выполнена оценка погрешности расчета ПЭС как для спокойных ионосферных условий, так и при наличии плазменного кольца. Для оценки погрешности использовалась динамическая модель электронной концентрации ионосферы Земли. Для выбранных входных параметров (день года, время суток и т. д.) рассчитывалось модельное двумерное распределение электронной концентрации по этой модели. При расчете в это двумерное распределение электронной концентрации вносились изменения, которые преобразовали его в распределение в наибольшей степени соответствующее реальной ионосфере, например, наличие плазменного кольца, провала и т. д. Используя полученное распределение, рассчитывались модельные величины (разностная фаза и полное электронное содержание). Затем они использовались для модельной оценки погрешностей расчета полного электронного содержания методом разнесенного приема. Для спокойных условий в ионосфере относительная погрешность определения начальной фазовой постоянной не превысила 3 %, а в случае плазменного кольца – 13 %, для вертикального полного электронного содержания относительная погрешность в спокойных условиях не превышала 7 %, при наличии плазменного кольца – 60 %. Большие значения относительной погрешности были в областях резкого изменения вертикального полного электронного содержания.

### Для цитирования

Черняков С. М. Модельная оценка точности расчета полного электронного содержания методом разнесенного приема сигналов низкоорбитальных спутников. Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 2. С. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-2-133-148>.

## Model evaluation of accuracy of obtaining total electron content by the method of spaced reception of low Earth orbit satellite signals

Sergei M. Cherniakov

*Polar Geophysical Institute, Murmansk, Russia;*  
*e-mail: smcherniakov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>*

### Article info

Received  
15.03.2022;

received  
in revised form  
17.05.2022

### Key words:

ionosphere,  
total electron content,  
error,  
spaced reception,  
low Earth orbit satellite

### Abstract

A model-based technique to estimate the accuracy of the ionospheric total electron content (TEC) based on the data from spaced receivers of low Earth orbit satellite signals has been suggested. That allows us to estimate the total electron content errors for both quiet ionosphere conditions and under the presence of a plasma ring. To estimate the error, the dynamic model of the electron concentration of the Earth's ionosphere has been used. For the selected input parameters (day of the year, time of day, etc.), a model two-dimensional electron density distribution has been calculated using this model. When calculating this two-dimensional distribution of the electron density, changes have been made that transformed it into a distribution that most closely matches the real ionosphere, for example, the presence of a plasma ring, a trough, etc. Using the obtained distribution, some model quantities (differential phase and total electron content) have been calculated. Then they are used for model estimation of errors in the calculation of the TEC by the spaced reception method. For quiet conditions in the ionosphere, the relative error of determining the initial phase constant does not exceed 3 %, and in the case of the plasma ring – 13 %. For the vertical total electron content, the relative error in quiet conditions does not exceed 7 %, and in the case of a plasma ring – 60 %. Large values of the relative error are in areas of sharp change of the vertical total electron content.

### For citation

Cherniakov, S. M. 2022. Model evaluation of accuracy of obtaining total electron content by the method of spaced reception of low Earth orbit satellite signals. *Vestnik of MSTU*, 25(2), pp. 133–148. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-2-133-148>.

## Введение

В изучении свойств верхней атмосферы, солнечно-земных связей большая роль принадлежит радиофизическим методам. Данные, передаваемые с помощью этих методов, служат исходным материалом для получения физической картины процессов, развивающихся в околоземном пространстве. Одним из активно используемых параметров является полное электронное содержание (ПЭС), равное суммарному числу свободных электронов в столбе единичного сечения. Существующие методы позволяют получать исходные данные для ПЭС непрерывно в автоматическом режиме, с большой точностью и малыми затратами.

Первые наблюдения ПЭС проводились в области ниже максимума слоя  $F_2$  (Ratcliffe, 1951). Впоследствии для получения ПЭС выше максимума слоя  $F_2$  использовали радиоотражение от Луны, прием сигналов космических источников, но такие эксперименты были редки. В настоящее время для этих целей иногда используются установки по исследованию ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн (Терещенко и др., 2019).

Запуски искусственных спутников Земли (ИСЗ) привели к появлению новых трансionoсферных (или радиопросвечивания) методов получения ПЭС, которые начали интенсивно развиваться. Сигнал, переданный бортовым передатчиком спутника, пройдя через ионизированную среду и испытав ее воздействие, принимается на Земле. Точное местоположение спутника в момент излучения сигнала определяют с помощью оскулирующих элементов орбиты ИСЗ и, зная положение приемного пункта, можно получить координаты любой точки линии зрения со спутника до приемного пункта и привязать в пространстве рассчитанное значение ПЭС (Афраймович и др., 2006а).

Для получения ПЭС используют, как правило, фазовые методы, поскольку для их применения не требуется создание специальных систем, также возможно использование спутников, запущенных для выполнения других целей. К ним относятся, например, навигационные и геостационарные спутники. Спутники, используемые для получения ПЭС, имеют различные параметры орбит. Это дает широкие возможности для изучения как пространственных, так и временных свойств ионосферы, причем в любом выбранном месте и в требуемое время.

Первые спутниковые навигационные системы были основаны на использовании низкоорбитальных спутников системы США "Транзит" (развернута в 1964 г.), летающих по околополюсной круговой орбите с высотой 1 100 км, и спутников отечественных систем "Цикада" и "Парус" (высота 1 000 км, период обращения 105 минут, наклонение 83°). Спутники этих систем непрерывно излучали по две когерентные частоты приблизительно 150 и 400 МГц. С самого начала эти спутники начали активно использовать в ионосферных исследованиях.

Современные спутники, находящиеся на низкой околоземной орбите (англ. low Earth orbit, LEO), имеют высоты до 2 000 км (например, созвездия спутников Iridium, Globalstar, SpaceX, Telesat, LeoSat, Kepler) и предназначены для различных целей, но некоторые из них используются для исследования ионосферы, поскольку на борту находятся передатчики, излучающие когерентные частоты (Ge et al., 2022). Предполагается, что низкоорбитальные спутники будут все активнее использоваться для целей коммуникации, наблюдения за поверхностью Земли и развития глобальной сети Интернет, и число их на орбите будет расти. При этом они будут нести на борту передатчики, предназначенные для навигационных целей, и зона их действия охватит весь земной шар. К достоинствам использования подобных спутников по сравнению со спутниками глобальных навигационных систем можно отнести лучшее покрытие Земли созвездием спутников и более сильный сигнал, получаемый навигационным приемником, что позволяет уменьшить ошибки позиционирования.

В Полярном геофизическом институте наблюдения сигналов низкоорбитальных навигационных спутников проводились с конца 1970-х годов. За это время накоплен большой массив данных, который может быть использован для анализа прошедших событий. Низкоорбитальные навигационные спутники, использовавшиеся для ПЭС, позволяли получать данные от полярной шапки до экватора. Пролет такого спутника над станцией наблюдения в течение нескольких минут давал квазистационарную пространственную картину распределения ПЭС в районе наблюдения. Сеть приемных станций, расположенная вдоль меридиана, давала широтный "разрез" ионосферы в течение одного пролета. Особенностью пролетов российских низкоорбитальных спутников в районе Кольского полуострова являлось то, что проекция их траектории на Землю при движении с севера на юг лежала практически вдоль геомагнитного меридиана.

На рис. 1 показана действовавшая цепочка российских приемных пунктов сигналов навигационных ИСЗ: пос. Верхнетуломский Мурманской области (68° 36' с. ш., 31° 46' в. д.), г. Кемь (64° 35' с. ш., 34° 36' в. д.) и г. Москва (55° 40' с. ш., 37° 38' в. д.). Поскольку эти спутники выполняли практическую задачу обеспечения навигационной информацией пользователей, то число их и параметры орбит были таковы, что один из спутников, как правило, находился в зоне радиовидимости приемной станции. Это позволяло получать информацию о текущем состоянии ионосферы, широтных вариациях полного электронного содержания,

наличии неоднородностей различного масштаба, а непрерывный мониторинг давал данные об изменении структур ионосферы.

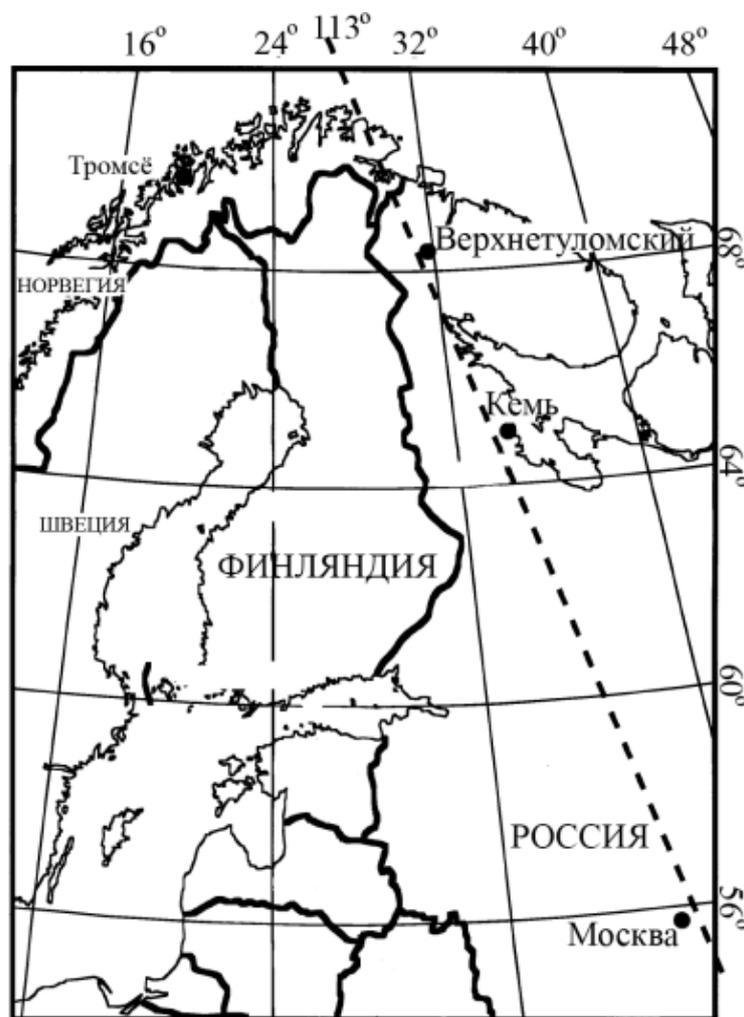


Рис. 1. Схема проведения наблюдений ПЭС. Штриховая линия – геомагнитный меридиан 113°  
Fig. 1. Scheme of TEC observations. The dashed line – geomagnetic meridian 113°

Возможности методов получения ПЭС обусловили многообразие интересов исследователей. Измерения ПЭС достаточно удобны для изучения крупномасштабных структур (Афраймович и др., 2006б). Большое количество данных по ПЭС, полученных в течение многих лет, позволяет проверить правильность моделей электронной плотности, дать рекомендации по их улучшению и использованию (Migoya-Orué et al., 2015). Отмечена связь структур ПЭС и геофизических проявлений различного характера: появление крупномасштабных неоднородностей в зоне полярных сияний и их связь с магнитной активностью (Пронин и др., 2019), влияние солнечных вспышек на ионосферу (Ясюкевич и др., 2013), изменение ПЭС при наличии высыпаний частиц (Belakhovsky et al., 2020). Совместное использование различных методов определения ПЭС дает возможность оценивать полное электронное содержание в плазмосфере (Jin et al., 2021). Большое значение имеют исследования ПЭС для работы систем связи, радиолокации и навигации. Широкие возможности ПЭС как характеристики физической системы ионосфера – магнитосфера привлекают внимание исследователей и стимулируют работы по развитию методов, связанных с получением ПЭС.

## Материалы и методы

### Фазоразностный метод получения ПЭС. Общее описание метода

Для получения ПЭС используют методы, основанные на различных физических принципах и аппаратуре. Из них можно выделить, как наиболее развитые в методическом и аппаратурном отношении, фазовые и фарадеевские методы радиопросвечивания с использованием спутниковых радиомаяков, а также метод групповой задержки, активно развиваемый в последнее время в связи с вводом в эксплуатацию спутников

глобальных навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС. Остальные методы (рефракционные, лунно-радарные и т. д.) в силу разных причин практически не используются.

Дальнейшее рассмотрение будет выполнено для низкоорбитальных навигационных спутников, поскольку они активно используются при наблюдениях ПЭС. Для спутников с другими параметрами орбит (средневысотных, геостационарных и т. д.) рассуждения во многом аналогичны.

На рис. 2, а приведена схема относительного расположения приемных пунктов  $R$  и спутников  $S$  для нисходящей ветви траектории. Для низколетящих навигационных спутников в районе расположения описанных выше приемных пунктов это означает, что спутник движется с севера на юг. Буквой  $R$  обозначен приемный пункт, поверхность Земли – косой штриховкой, С и Ю – север и юг, соответственно, а линия СЮ (в нашем случае) – геомагнитный меридиан. Последовательные положения спутника на траектории обозначены через  $S_1, S_2, S_3$ . Между спутником и поверхностью Земли двумя сплошными линиями выделена сферическислоистая область, представляющая собой идеализированную однородную ионосферу.

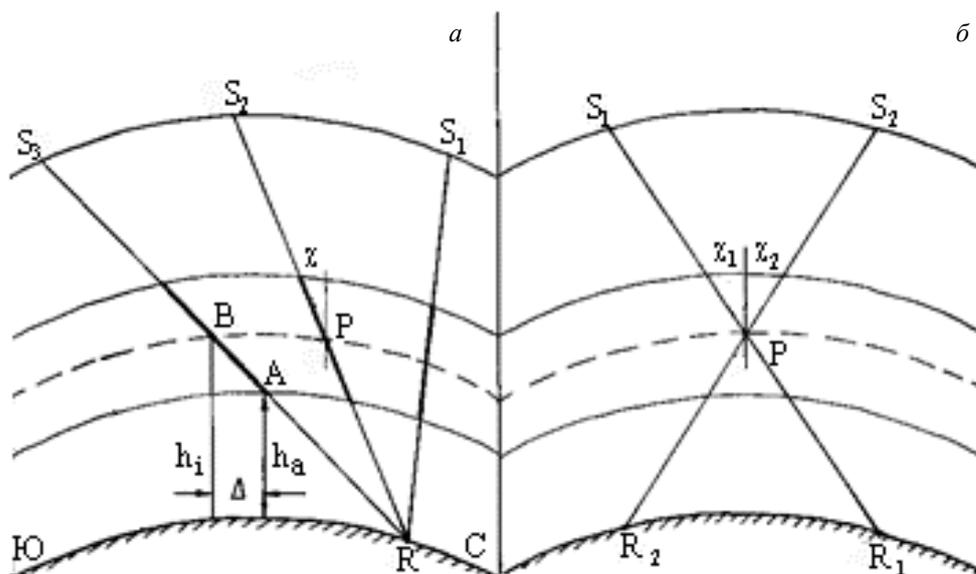


Рис. 2. Относительное расположение приемных пунктов и спутников

Fig. 2. Relative location of receiving points and satellites

Наиболее простым в аппаратном отношении и легким в исполнении и последующей обработке данных является фазоразностный метод (Куницын и др., 2007). На его основе уже выполнено большое число наблюдений ПЭС, а число действующих и пригодных для использования спутников (навигационных, геостационарных, специального назначения) позволяет планировать целенаправленные наблюдения по программам, скоординированным с другими исследователями.

Фазоразностный метод основан на свойстве ионизированной среды влиять на фазу проходящего через нее сигнала. В вакууме расстояние  $L$  от приемника ( $R$ ) до спутника ( $S$ ) определяется формулой

$L = \int_R^S ds$ , где  $ds$  – элемент расстояния. Отсюда число длин волн равно  $n_\lambda = L/\lambda = \frac{1}{2} \int_R^S ds$ . "Фазовое

расстояние"  $\Psi$  от спутника до приемника в данном случае определяем как величину, равную изменению фазы на пути от спутника до приемника. Для случая вакуума фазовое расстояние от передатчика на спутнике

до приемника на Земле равно  $\Psi_B = 2\pi n_\lambda = \frac{2\pi}{\lambda} \int_R^S ds$ . Учитывая, что  $\lambda = cT = c \frac{1}{f}$ , где  $c$  – скорость света

в вакууме,  $T$  – период волны,  $f$  – излучаемая частота, получим

$$\Psi_B = \frac{2\pi f}{c} \int_R^S ds. \quad (1)$$

Если между передатчиком и приемником находится ионизированная среда (в рассматриваемом случае – это земная ионосфера), то фазовое расстояние изменится и выражение (1) запишется в виде:

$$\Psi_{\text{и}} = \frac{2\pi f}{c} \int_R^S \mu ds,$$

где  $\mu$  – показатель преломления. Для волны с частотой много больше критической частоты слоя  $F2$ :  $f \gg f_0 F2$ , его можно записать в виде (Гинзбург, 1967):

$$\mu \cong 1 - \frac{kN}{f^2},$$

где  $N$  – электронная плотность,  $k$  – постоянная. Так как для большинства случаев в ионосфере критическая частота  $F$  области меньше 15 МГц, а используемые в наших наблюдениях когерентные частоты равны 150 и 400 МГц (в случае низкоорбитальных навигационных спутников), то это соотношение выполняется всегда. Единица определяет вакуумную составляющую, а второй член показывает вклад ионосферы в изменение фазового расстояния. Видно, что волны с различной частотой имеют различные длины фазового пути. Рассматривая когерентные частоты  $f_1 = mf_0$  и  $f_2 = nf_0$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа, а  $f_0$  – частота опорного генератора, можно вычислить фазовую разность двух когерентных волн, прошедших через ионосферу от спутника до приемной точки. В случае низкоорбитальных навигационных спутников, рассмотрению которых будут посвящены дальнейшие рассуждения,  $f_0 = 50$  МГц,  $m = 3$  ( $f_1 = 150$  МГц),  $n = 8$  ( $f_2 = 400$  МГц). Таким образом, будет взаимно вычтена вакуумная составляющая фазового расстояния, присутствующая в обоих фазовых путях, и результирующая фазовая разность  $\Phi$  будет зависеть только от свойств ионосферы, а точнее от ПЭС.

Сигнал большей частоты (400 МГц) испытывает меньшее воздействие ионосферы и его можно считать эталонным, не испытывающим изменений. В большинстве случаев такое предположение дает хорошее приближение, тем не менее надо помнить, что сигнал 400 МГц тоже испытывает влияние ионосферы, хотя и на порядок меньшее. Считается, что меньший по частоте сигнал 150 МГц несет на себе "воздействие" ионосферы. Фазовые расстояния для двух разных частот  $f_1$  и  $f_2$  запишутся, соответственно,  $\Psi_{и1} = \frac{2\pi f_1}{c} \int_R^S \mu_1 ds$  и  $\Psi_{и2} = \frac{2\pi f_2}{c} \int_R^S \mu_2 ds$ . Чтобы привести фазу частоты 400 МГц к фазе 150 МГц, умножим  $\Psi_{и2}$  на  $m/n$ . Подобная операция выполняется в приемном устройстве аппаратно, т. е. "приведенная" фаза 400 МГц будет равна

$$\Psi_{и2}^* = \Psi_{и2} \frac{m}{n} = \frac{2\pi m f_0}{c} \int_R^S \mu_2 ds.$$

Тогда "разностная" фаза будет равна

$$\Phi = \Psi_{и2}^* - \Psi_{и1} = \frac{2\pi k}{c} \frac{f_0}{f_1} \left(1 - \frac{m^2}{n^2}\right) \int_R^S N ds. \quad (2)$$

При этом  $\Phi = C \int_R^S N ds$ , где  $C$  – постоянная,  $\int_R^S N ds$  – полное электронное содержание вдоль луча зрения со спутника до приемника. Видно, что разностная фаза прямо зависит от полного электронного содержания.

При проведении наблюдений на выходе приемника в цифровом виде записываются квадратуры, представляющие собой сдвинутые на  $90^\circ$  амплитудно-фазовые составляющие разностного сигнала, которые затем служат исходным материалом для расчета разностной фазы и амплитуды (Терещенко, 1987). В дальнейшем под фазой мы будем понимать разностную фазу. В результате после обработки квадратур рассчитывают массив экспериментальных фаз  $\Phi$  за время пролета спутника. При расчетах первое значение фазы обычно приравнивают нулю, изменяя при этом значения фаз в массиве на величину этого изменения. Отметим, что при наблюдениях разностной фазы мы фиксируем лишь ее изменения, обусловленные как движением спутника, при котором луч зрения со спутника до приемника пересекает разные области ионосферы, так и изменением самой ионосферы.

Рассматривая экспериментальный дискретный временной ряд изменений фазы  $\Phi_i$ , получаемый вдоль траектории пролета спутника, формулу расчета фазы (2) можно переписать следующим образом:

$$\Phi_i + \Phi_0 = C T_i; \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (3)$$

где  $\Phi_i$  – значение наблюдаемой разностной фазы в момент времени  $t_i$ ,  $\Phi_0$  – неизвестная начальная фаза,  $C$  – постоянная,  $T_i$  – ПЭС вдоль луча зрения в момент времени  $t_i$ ,  $k$  – число точек отсчета вдоль траектории спутника.

Основная трудность расчета полного электронного содержания вдоль линии зрения приемник – спутник заключается в том, что нам неизвестна фаза  $\Phi_0$ , набравшаяся при прохождении сигнала от спутника до приемника в начальный момент записи, так называемая начальная фазовая постоянная. Таким образом,

мы не можем рассчитать ПЭС между приемным пунктом и спутником в начальный момент записи. Поэтому фактически по изменению экспериментальной фазы во время движения спутника можно рассчитать только изменение ПЭС. Для того чтобы получить массив значений ПЭС между приемником и спутником по формуле (3) надо знать начальную фазовую постоянную  $\Phi_0$ . Значение ПЭС вдоль луча зрения обычно называют наклонным ПЭС. Из этой формулы видно, что ПЭС будет иметь вид, подобный исходной фазовой кривой.

Значение наклонного ПЭС вычисляют интегрированием электронной плотности вдоль линии зрения от антенны приемника на спутник, и его нельзя отнести к какой-то конкретной точке пространства. В таком виде ПЭС применяется для решения некоторых задач, но при необходимости локализации возмущений, фиксируемых в ПЭС, возникает неопределенность в их положении. Для устранения неопределенности ПЭС привязывают к какой-либо высоте на линии зрения. Для этого используют приближение тонкого фазового экрана (*Исмару, 1981*), согласно которому изменения в сигнале происходят лишь на этом экране, расположенном на какой-то высоте. В месте пересечения Р луча зрения приемник – спутник с этой высотой (рис. 2), которое называют ионосферной точкой (точкой прокола или прокалывания ионосферы, англ. *ionosphere pierce point, IPP*), выполняется геометрический пересчет наклонного ПЭС в вертикальное полное электронное содержание (ВПЭС) простым умножением ПЭС на косинус угла  $\chi$  между вертикалью и лучом зрения со спутника на приемник. При этом ВПЭС представляет собой полное электронное содержание в вертикальном столбе единичного сечения, проходящего через ионосферную точку. В этом случае формула (3) примет вид:

$$\Phi_i + \Phi_0 = CD_i I_i, \quad (4)$$

где  $D_i = \sec \chi_i$ ,  $I_i$  – вертикальное полное электронное содержание. Проекцию этой точки Р на Землю называют подионосферной точкой. Это позволяет привязать значение ВПЭС к земным координатам.

Уравнение (4) является исходным для расчетов ВПЭС. Значения  $C$ ,  $D_i$  и  $\Phi_i$  известны из наблюдений и расчетов. Для каждого момента записи  $t_i$  мы имеем одно уравнение с двумя неизвестными,  $\Phi_0$  и  $I_i$ , решить которое можно лишь введя некоторое дополнительное условие. Существуют различные методы получения этих неизвестных величин по уравнению (4), в случае, когда мы принимаем сигналы только в одном пункте, но все они в той или иной мере основаны на предположениях о структуре электронной плотности в ионосфере. Они дают удовлетворительные результаты лишь при изменениях ПЭС, которые можно описать полиномами невысоких порядков (*Черняков и др., 1992*).

### Получение ВПЭС с использованием дополнительного независимого измерения

Потребность в решении задачи нахождения более точного значения неизвестной начальной постоянной приводит к необходимости использования дополнительного метода для получения независимой величины ПЭС, которая может быть либо прямо сравнена с уже полученным значением ПЭС в данной точке, либо как-то опосредовано. Тем самым появляется возможность убрать неоднозначность решения уравнения (4) и нет необходимости вводить предположение о виде ионосферы. Хотя сами независимые величины могут определяться неточно и при этом вносить ошибку в определение  $\Phi_0$ , тем не менее это способ избежать неоднозначности и получить значение  $\Phi_0$  на основе реальных измерений. Это, в свою очередь, позволит улучшить оценку вычисляемой величины.

Одновременные наблюдения сигналов ИСЗ при пролете спутника проводились на различных станциях в основном с целью сравнения результатов расчетов ПЭС по различным методикам и коррекции полученных значений, поскольку предполагалось, что в области ионосферы, которую одновременно видели с обеих станций, значение ВПЭС должно быть одинаково. Авторы (*Narayana et al., 1968*) предположили, что если станции разнесены вдоль проекции орбиты ИСЗ на Землю, то луч зрения на спутник будет проходить через одну и ту же область ионосферы для различных приемных станций в разные моменты времени и под разными углами (*Narayana et al., 1968*). На рис. 2, б показана общая схема расположения приемных станций R1 и R2, положение спутника S1 и S2 для станций R1 и R2, соответственно, и положение общей ионосферной точки Р. Предполагается, что ВПЭС в этой общей точке Р ионосферы для разных станций будет одинаково. В таком случае, для этой точки можно записать систему уравнений

$$\begin{aligned} \Phi_{i1} + \Phi_{01} &= CD_{i1} I_i, \\ \Phi_{i2} + \Phi_{02} &= CD_{i2} I_i, \end{aligned}$$

где индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к первой и второй приемным станциям. Остальные обозначения как в уравнении (4). Записав подобную систему для другой точки Р и решив системы, можно получить значения неизвестных постоянных первой и второй станций:  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  соответственно. В связи с этим по данным двух наблюдений на двух станциях можно получить значения неизвестных начальных постоянных.

Дальнейшее развитие фазоразностных измерений в нескольких приемных точках предложено в работе (Leitinger et al., 1975), оно лежит в основе рассматриваемого метода разнесенного приема. Если использовать метод наименьших квадратов для массивов данных на двух станциях, то можно определить эти неизвестные постоянные, исходя из минимума следующего выражения:

$$\sum_{i=1}^k (\Phi_{01} / D_{i1} + \Phi_{i1} / D_{i1} - \Phi_{02} / D_{i2} - \Phi_{i2} / D_{i2})^2,$$

где  $k$  – число общих точек в массиве экспериментальных данных. Тем самым значительно улучшается оценка получаемых значений начальных фазовых постоянных  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$ .

## Результаты и обсуждение

### Модельная оценка точности получения полного электронного содержания методом разнесенного приема сигналов низкоорбитальных спутников

Как показали предыдущие исследования, использование метода разнесенного приема сигналов спутников является информативным способом получения данных о структуре и динамике ионосферы (Брюнелли и др., 1992; Черняков и др., 1995). Как и при применении других методов в экспериментальных исследованиях, существенным является вопрос точности получаемых ими данных. Сравнение результатов с данными независимых экспериментальных методов показало его применимость с хорошей точностью для исследования высокоширотной ионосферы в условиях различных возмущений (Черняков и др., 1992; Chernyakov et al., 1993).

Наличие моделей ионосферы дает возможность проводить оценку точности экспериментальных методов. Формирование структур электронной плотности с помощью модели ионосферы позволяет проверить, какую точность может дать тот или иной экспериментальный метод в исследуемых условиях. В нашем случае, используя модель ионосферы, мы можем оценить точность определения ПЭС при использовании метода разнесенного приема сигналов низкоорбитальных навигационных спутников.

В качестве исходной модели ионосферы взята динамическая модель электронной концентрации ионосферы Земли на геомагнитных широтах, больших  $60^\circ$ , в интервале высот от 100 до 1 000 км<sup>1</sup>. Ее достоинством также является то, что она полностью описывается в виде простых уравнений и для расчета значений электронной концентрации не требует много времени. Для заданных координат точки (широта, долгота, высота), задав входные параметры, описывающие время и геомагнитную ситуацию, можно рассчитать значение электронной концентрации в этой точке. Задав двумерное распределение точек в плоскости пролета низкоорбитального спутника, можно получить пространственное распределение электронной концентрации для заданного момента времени.

Динамическая модель, как правило, описывает достаточно гладкое поведение ионосферы. Приближенное к реальности распределение электронной плотности можно получить с использованием экспериментально полученного широтного профиля ВПЭС, либо создавая этот профиль, в зависимости от задачи (Черняков, 2004). На рис. 3, а–в, 4, а–в приведены примеры адаптации динамической модели ионосферы к экспериментально полученным профилям ВПЭС для суббури 19–20 марта 1991 г. (Черняков и др., 1995). На рис 3, а–в показано распределение электронной концентрации перед началом суббури (невозмущенная ионосфера, 19.03.1991, 12:08 UT) и во время суббури (20.03.1991, 00:58 UT) (рис. 4, а–в). На рис. 3, а, 4, а показаны примеры распределения электронной концентрации по динамической модели в плоскости пролета низкоорбитального спутника, на рис. 3, б, 4, б представлены профили ВПЭС по данным наблюдений (сплошная линия) и рассчитанных из модели (штриховая), на рис. 3, в, 4, в – адаптированное пространственное распределение электронной концентрации.

Модельная оценка точности восстановления ПЭС с использованием метода разнесенного приема основывалась на данных реальных пролетов спутников и местоположении использовавшихся в экспериментах приемных пунктов сигналов спутников. Для выбранного пролета спутника рассчитывалось модельное двумерное распределение электронной концентрации, а также параметры орбиты спутника (широта, долгота и высота) в выбранный момент времени пролета. Знание координат спутника и приемного пункта позволяет рассчитать дальность до спутника по линии зрения приемный пункт – спутник для выбранного момента времени. Для нахождения полного электронного содержания вдоль линии зрения приемник – спутник высота ионосферы разбивалась на равные участки от 100 до 1 000 км и в местах пересечения линии зрения приемник – спутник с высотами по динамической модели рассчитывалась электронная концентрация. Затем находилась средняя электронная концентрация на отрезке линии зрения между соседними высотами и длина этого отрезка. Произведение средней электронной концентрации на длину отрезка дает оценку ПЭС вдоль этого отрезка. Суммирование ПЭС всех отрезков по линии зрения приемник – спутник дает оценку наклонного ПЭС вдоль всей линии зрения. Зная значение полученного ПЭС, можно рассчитать полную фазу  $F$  вдоль линии зрения приемник – спутник с использованием уравнения (3).

<sup>1</sup> ГОСТ 25645.140-86 – 25645.142-86. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. М., 1986. 28 с.

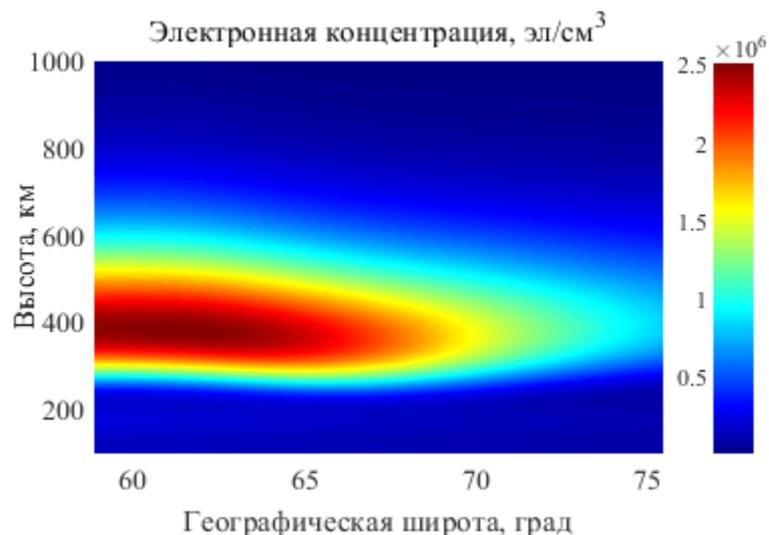


Рис. 3, а. Пространственное распределение электронной концентрации, рассчитанное по эмпирической модели для 19.03.1991, 12:08 UT  
 Fig. 3, a. Spatial distribution of electron density calculated using the empirical model for 19.03.1991 at 12:08 UT

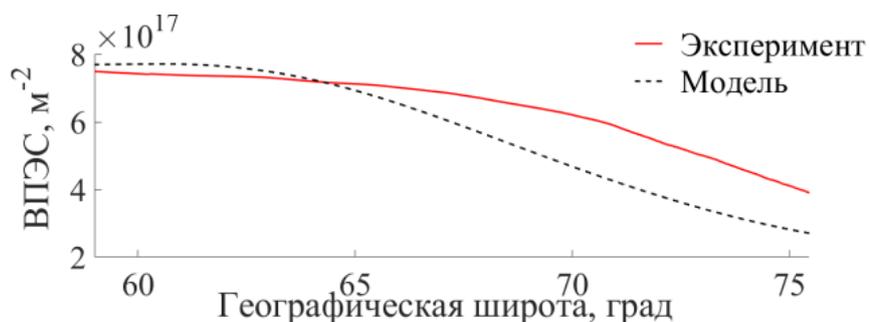


Рис. 3, б. Вид кривых ВПЭС по данным наблюдений (сплошная линия) и рассчитанных из модели (штриховая) для 19.03.1991, 12:08 UT  
 Fig. 3, б. The VTEC curves according to the observation data (solid line) and calculated from the model (dashed line) for 19.03.1991 at 12:08 UT

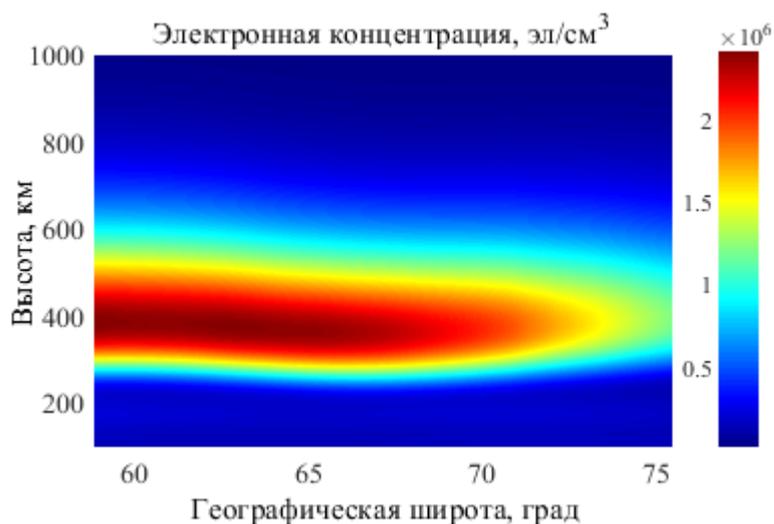


Рис. 3, в. Адаптированное пространственное распределение электронной концентрации для 19.03.1991, 12:08 UT  
 Fig. 3, в. The adapted form of the spatial distribution of the electron density for 19.03.1991 at 12:08 UT

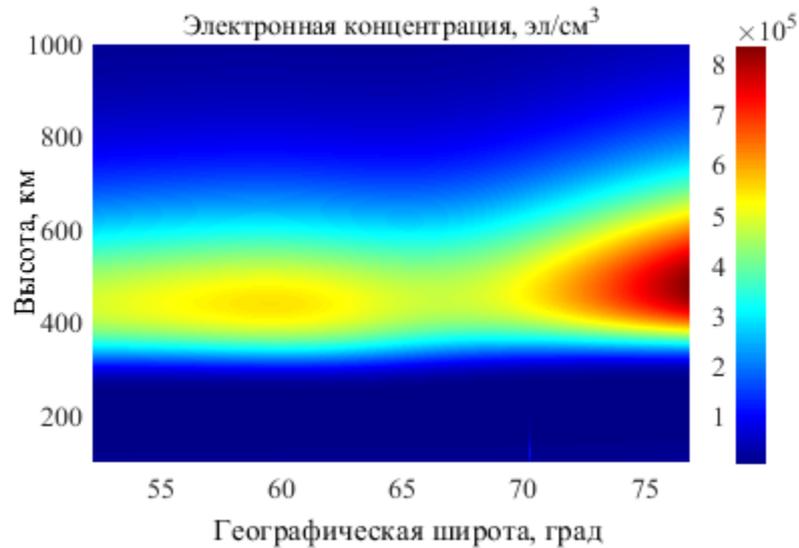


Рис. 4, а. Пространственное распределение электронной концентрации, рассчитанное по эмпирической модели для 20.03.1991, 00:58 UT  
Fig. 4, a. Spatial distribution of electron density calculated using the empirical model for 20.03.1991 at 00:58 UT

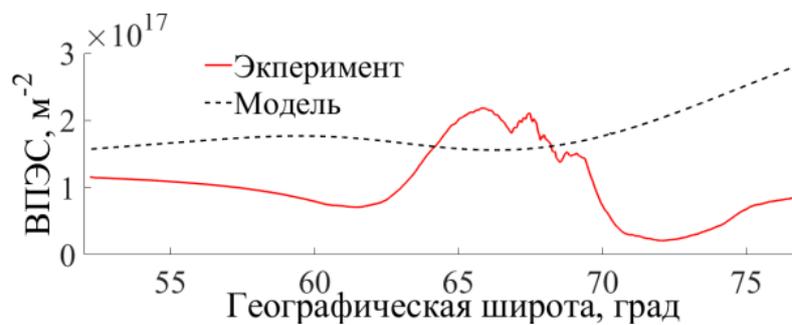


Рис. 4, б. Вид кривых ВПЭС по данным наблюдений (сплошная линия) и рассчитанных из модели (штриховая) для 20.03.1991, 00:58 UT  
Fig. 4, б. The VTEC curves according to the observation data (solid line) and calculated from the model (dashed line) for 20.03.1991 at 00:58 UT

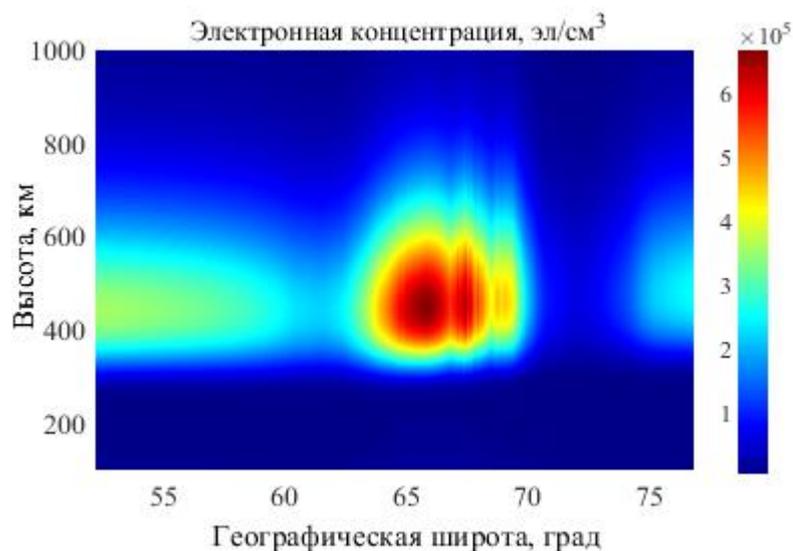


Рис. 4, в. Адаптированное пространственное распределение электронной концентрации для 20.03.1991, 00:58 UT  
Fig. 4, в. The adapted form of the spatial distribution of the electron density for 20.03.1991 at 00:58 UT

Задавая реальное время пролета спутника и его координаты, можно получить для выбранного пункта приема сигналов спутников модельные значения полной фазы  $F_i$  вдоль линии зрения приемник – спутник для каждого момента времени пролета спутника, т. е., в конечном счете, массив значений полных модельных фаз  $F_i$ . Вычитая из полученного массива фаз  $F_i$  значение фазы в начальный момент расчета  $F_0$ , можно получить массивы фаз  $\Phi_i$ , которые соответствуют фазам, получаемым в эксперименте (нулевая первая фаза и ее последующее изменение) для каждого приемного пункта. Значение модельной полной фазы  $F_0$  в начальный момент времени расчета представляет собой неизвестную начальную фазу, определение которой составляет основную трудность при экспериментальном определении ПЭС. Используя полученные для каждого приемного пункта массивы модельных фаз  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{i2}$  с вычитенной начальной фазой, по методу разнесенного приема можно рассчитать начальные фазы для каждого приемного пункта ( $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$ ). Сравнение начальных фаз, полученных в результате расчета методом разнесенного приема ( $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$ ), с модельными значениями полных фаз в начальный момент ( $F_{01}$ ,  $F_{02}$ ) даст возможность оценить погрешность метода для каждого приемного пункта.

Оценим точность определения ПЭС на примере двух модельных пространственных распределений электронной концентрации, подобных приведенным на рис. 3 и 4. Первое распределение (рис. 3) соответствует спокойному состоянию в ионосфере в дневное время, второе можно наблюдать во время суббури при появлении плазменного кольца в районе наблюдения (рис. 4) (Черняков и др., 1995). Интегрирование электронной концентрации по высоте для каждой из широт, которые использовались для расчета двумерной модельной картины электронной концентрации, дает модельное ВПЭС для каждой из этих широт. Это позволяет построить модельный профиль ВПЭС по широте. Этот профиль ВПЭС не зависит от выбора пункта наблюдения, а рассчитан непосредственно из двумерного распределения электронной концентрации.

На рис. 5, а показано модельное распределение электронной концентрации для спокойных условий, на рис. 6, а – для случая плазменного кольца в районе наблюдения. Для расчета полных фаз  $F$  и ВПЭС выбраны времена и траектория спутника, соответствующие реальному пролету спутника в районе наблюдения. Положения приемных пунктов в модельных расчетах близки к положениям реальных приемных пунктов, в которых выполняли наблюдения сигналов низкоорбитальных навигационных спутников в экспериментах. Для пункта R1 выбраны координаты  $69^\circ$  с. ш.,  $33^\circ$  в. д. (пос. Верхнетуломский), для пункта R2 –  $65^\circ$  с. ш.,  $33^\circ$  в. д. (г. Кемь).

Для каждого пункта наблюдения и для каждого распределения электронной концентрации для пролета спутника рассчитывался свой массив наклонного ПЭС и, следовательно, полных фаз  $F_i$ . На приведенных далее рисунках синим цветом обозначены фазы  $F$  и ВПЭС, рассчитанные для пункта R1, красным – для пункта R2. Примеры получаемых фаз  $F_i$  приведены на верхних рисунках 5, б и 6, б.

Перерасчет наклонного ПЭС в ВПЭС был выполнен согласно формулы (4). Для расчета угла  $\chi$  использовалась формула

$$\sin\chi = Re \cdot \cos\theta / (Re + h_i),$$

где  $Re$  – радиус Земли,  $h_i$  – ионосферная высота,  $\theta$  – угол места спутника.

Ионосферная высота была взята равной 400 км. Для расчета выбирались углы места спутников более  $30^\circ$ . Обычно полагают, что выбор высоты ионосферной точки не критичен для перерасчета при высоте угла возвышения более  $30^\circ$ , а высота 400 км вполне подходит для решения большинства задач (Афраймович и др., 2006а).

На нижних рисунках 5, б и 6, б приведено ВПЭС, которое было получено для разных пунктов наблюдения при выбранных распределениях электронной концентрации. Видно, что широтные профили ВПЭС, получаемые в различных пунктах приема, зависят от пункта наблюдения. Кроме этого, они отличаются от модельного ВПЭС, который не зависит от конкретного пункта наблюдения (черная линия). Это связано с тем, что для получения ВПЭС в пункте наблюдения используется наклонное ПЭС, для расчета которого берутся направления, отличные от вертикального. Таким образом, при расчете учитываются области ионосферы, находящиеся вне вертикали в точке перерасчета, что вносит погрешность в получаемое ВПЭС относительно модельного ВПЭС. Отметим также, что выбор высоты перерасчета влияет на величину получаемого ВПЭС.

Другими словами, сравнение модельного ВПЭС с ВПЭС, получаемом в пункте наблюдения, можно использовать для оценки погрешностей, связанных с положением приемной станции относительно рассматриваемых структур в ионосфере и выбором высоты перерасчета наклонного ПЭС в ВПЭС. В случае спокойной ионосферы (рис. 5, б) модельное ВПЭС и ВПЭС, определяемое в пунктах наблюдения, близки друг к другу. При этом в спокойных геофизических условиях вид ВПЭС восстанавливается в приемных пунктах достаточно хорошо. При наличии в ионосфере изолированных неоднородностей (рис. 6, б) широтные профили ВПЭС, которые получают в разных приемных пунктах, и модельный широтный профиль ВПЭС имеют различия. Наибольшее несоответствие наблюдается в местах с резким изменением электронной концентрации.

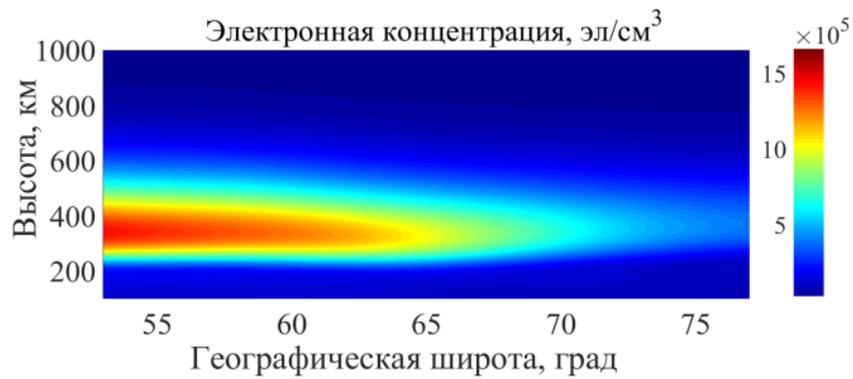


Рис. 5, а. Модельное распределение электронной концентрации (спокойные условия)  
 Fig. 5, a. Model distribution of electron concentration (quiet conditions)

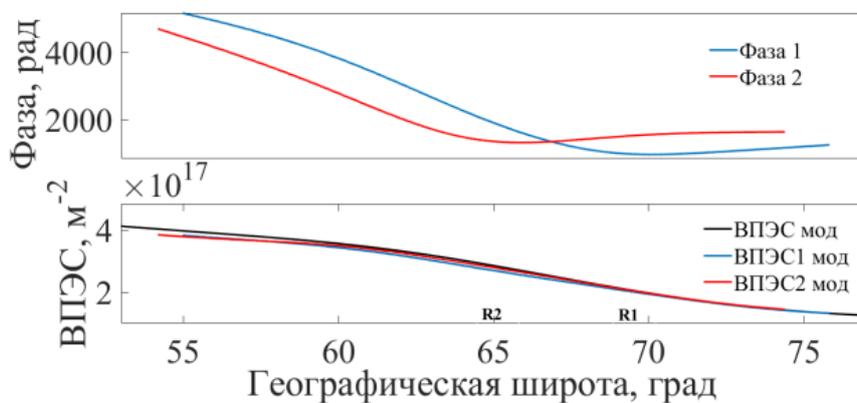


Рис. 5, б. Вид рассчитанных модельных фаз (вверху) и ВПЭС (внизу) из пунктов наблюдения R1 и R2, черная линия на нижнем рисунке – модельное ВПЭС по широте (спокойные условия)  
 Fig. 5, б. Type of calculated model phases (top) and VTEC (bottom) from observation points R1 and R2, black line in the lower figure – calculated model VTEC by latitude (quiet conditions)

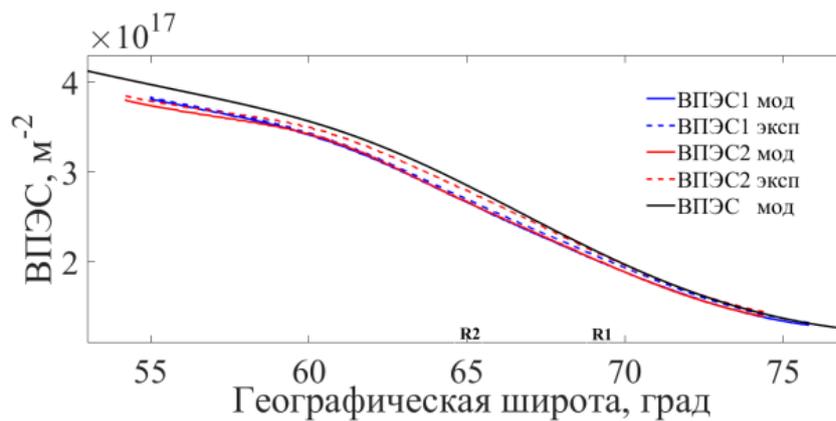


Рис. 5, в. Вид рассчитанного модельного ВПЭС (черная линия) и рассчитанного ВПЭС из пунктов наблюдения R1 и R2 (спокойные условия)  
 Fig. 5, в. Behavior of the calculated model VTEC (black line) and the calculated VTEC from observation points R1 and R2 (quiet conditions)

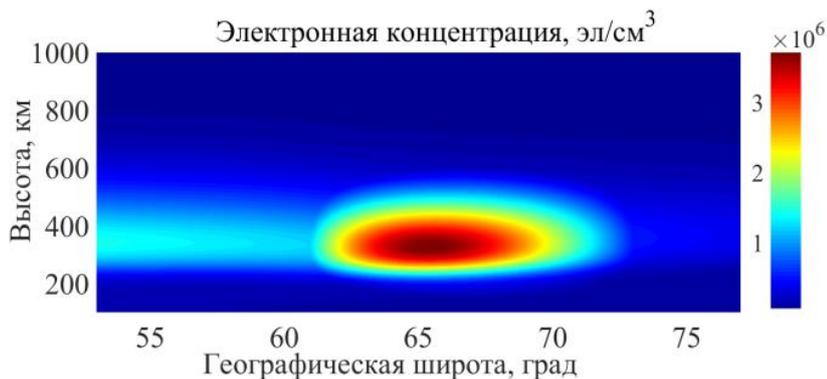


Рис. 6, а. Модельное распределение электронной концентрации (плазменное кольцо)  
 Fig. 6, a. Model distribution of electron concentration (the plasma ring)

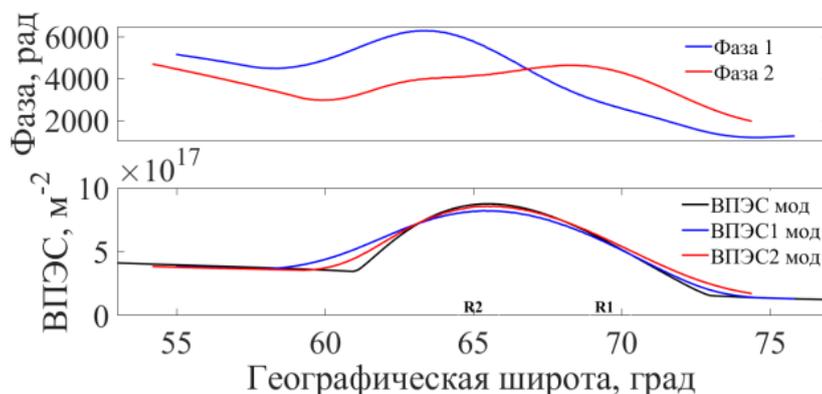


Рис. 6, б. Вид рассчитанных модельных фаз (вверху) и ВПЭС (внизу) из пунктов наблюдения R1 и R2, черная линия на нижнем рисунке – модельное ВПЭС по широте (плазменное кольцо)  
 Fig. 6, б. Type of calculated model phases (top) and VTEC (bottom) from observation points R1 and R2, black line in the lower figure – the calculated model VTEC by latitude (the plasma ring)

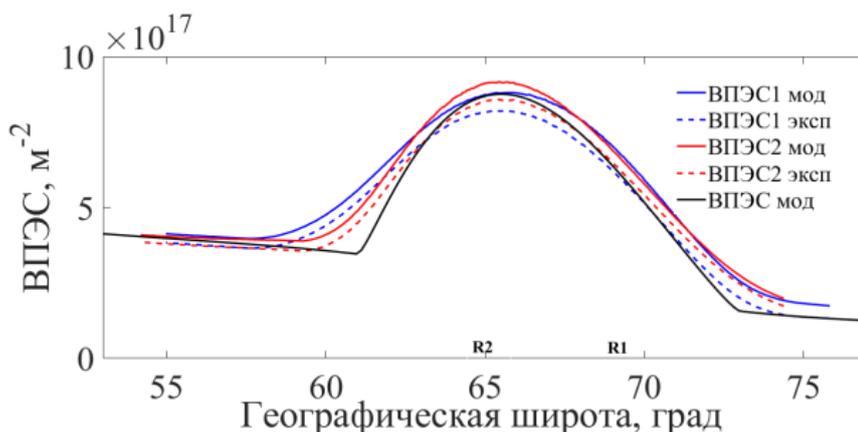


Рис. 6, в. Вид рассчитанного модельного ВПЭС (черная линия) и рассчитанного ВПЭС из пунктов наблюдения R1 и R2 (плазменное кольцо)  
 Fig. 6, в. Behavior of the calculated model VTEC (black line) and the calculated VTEC from observation points R1 and R2 (the plasma ring)

Для получения массива модельных фаз  $\Phi_i$ , соответствующих фазам, получаемым при экспериментальных наблюдениях, в каждом приемном пункте из массива модельных полных фаз  $F_i$ , рассчитанных для этого приемного пункта, вычиталось значение первой фазы  $F_0$ . В идеальном варианте начальные фазовые постоянные  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$ , рассчитанные из модельных массивов фаз  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{i2}$  по методу разнесенного приема сигналов, должны быть равны, соответственно, первым фазам  $F_{01}$  и  $F_{02}$  в массивах модельных полных фаз  $F_i$ , из которых были получены массивы  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{i2}$ . Различие в величинах  $\Phi_0$  и  $F_0$  будет говорить о погрешности определения

начальной фазовой постоянной при расчете методом разнесенного приема, а следовательно, о величине погрешности определения ПЭС.

Начальные фазовые постоянные (начальные фазы)  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  из фаз  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{i2}$  были рассчитаны по методу разнесенного приема для случаев спокойной ионосферы и плазменного кольца. Для различения ВПЭС, определяемого из модели для данного пункта и не содержащего ошибки определения начальной фазовой постоянной, и ВПЭС, определяемого в приемном пункте с использованием метода разнесенного приема, назовем результаты, относящиеся к этим расчетам, "экспериментальными", поскольку эти расчеты аналогичны расчетам с массивами экспериментальных фаз. Используя полученные значения рассчитанных начальных фаз  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  и массивы фаз  $\Phi_{i1}$  и  $\Phi_{i2}$ , по формуле (4) можно получить "экспериментальное" ВПЭС для первого и второго приемных пунктов, в которое входит погрешность определения начальной фазовой постоянной при расчете по методу разнесенного приема. Это дает возможность сравнить поведение ВПЭС, полученного из модели в пункте приема, с "экспериментальным" ВПЭС, полученным с использованием метода разнесенного приема, т. е. оценить влияние погрешности определения начальной фазовой постоянной на погрешность расчета ВПЭС.

На рис. 5, в и 6, в приведено модельное ВПЭС (черная линия), а также ВПЭС, рассчитанные для пунктов наблюдения R1 и R2: сплошная линия – ВПЭС, рассчитанное по ПЭС, полученному из модели, и штриховое – ВПЭС, рассчитанное по методу разнесенного приема из фаз  $\Phi$  ("эксперимент"). Сравнение ВПЭС, полученного из модели в данном пункте, и "экспериментального" ВПЭС, рассчитанного из фаз  $\Phi$ , показывает, что они во многом похожи.

Для оценки погрешности определения ВПЭС была рассчитана относительная погрешность  $\delta$  расчета "экспериментального" ВПЭС, рассчитанного из пункта наблюдения R1, относительно модельного ВПЭС, не зависящего от пункта наблюдения, по формуле:

$$\delta_{\text{экс}} = \frac{\text{ВПЭС}_{\text{экс}} - \text{ВПЭС}_{\text{мод}}}{\text{ВПЭС}_{\text{мод}}} \cdot 100 \%$$

Расчет относительной погрешности выполнялся для значений ВПЭС вдоль широтного профиля ВПЭС. На рис. 7, а нарисованы значения относительной погрешности в зависимости от широты для спокойных условий, а на рис. 7, б – в случае плазменного кольца.

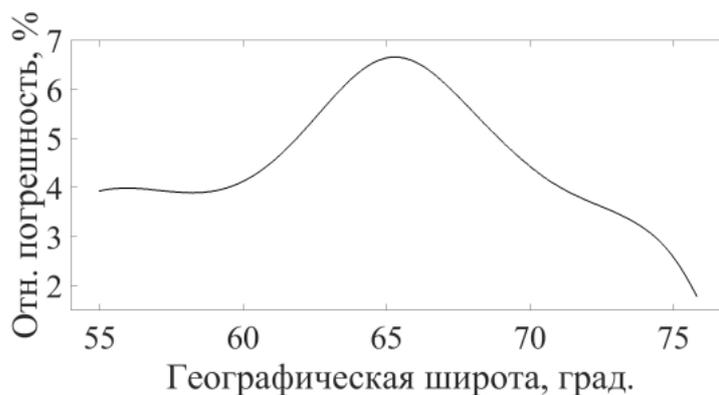


Рис. 7, а. Относительная погрешность ВПЭС для спокойных условий в ионосфере  
Fig. 7, a. Relative error of VTEC for quite conditions in the ionosphere

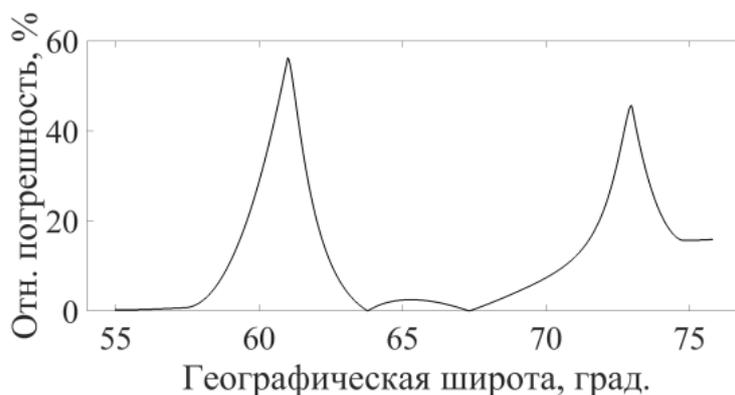


Рис. 7, б. Относительная погрешность ВПЭС для случая плазменного кольца в ионосфере  
Fig. 7, б. Relative error of VTEC for the case of the plasma ring in the ionosphere

Аналогичные расчеты для фаз в приемном пункте R1 показали следующее: а) для спокойных условий разность начальных фазовых постоянных  $\Phi_0$  и  $F_0$  равна  $33,3^\circ$ , относительная погрешность – 2,7 %; б) для случая плазменного кольца разность  $\Phi_0$  и  $F_0$  равна  $186,2^\circ$ , относительная погрешность – 12,8 %. В связи с этим можно сказать, что для рассмотренных случаев метод разнесенного приема дает удовлетворительную оценку начальной фазовой постоянной.

Рассмотренные случаи показывают, что для приемных пунктов, разнесенных на четыре градуса вдоль долготы, в случае спокойных условий в ионосфере относительная погрешность определения ВПЭС с использованием метода разнесенного приема не превышает 7 %. В случае плазменного кольца относительная погрешность определения ВПЭС меняется в зависимости от широты и не превышает 60 %. Повышенные значения относительной погрешности относятся к областям с резким изменением ВПЭС. В спокойных условиях форма и величина ВПЭС восстанавливается хорошо. В случае плазменного кольца относительная погрешность определения ВПЭС зависит от формы плазменного кольца и наибольшая в областях резкого изменения ВПЭС.

Адаптируя динамическую модель ионосферы, можно получить двумерное распределение электронной концентрации, близкое к наблюдаемому в эксперименте, и, проведя модельные расчеты, получить оценочные значения погрешностей определения начальной фазовой постоянной для реальной конфигурации приемных пунктов и условий в ионосфере. Преимуществом такого подхода к оценке точности получаемой начальной фазовой постоянной является то, что, меняя расположение приемных пунктов относительно друг друга, можно оценить влияние расстояния между приемными пунктами на точность определения экспериментального ВПЭС, а также пространственное разрешение структур электронной плотности. Это позволит при подготовке эксперимента выбрать расстояния между приемными пунктами, которые соответствуют поставленной задаче.

### Заключение

Предложена методика, позволяющая оценить погрешность получения полного электронного содержания методом разнесенного приема сигналов низкоорбитальных спутников. Оценены значения погрешностей определения начальной фазовой постоянной и ВПЭС для случаев спокойной ионосферы и плазменного кольца. Для спокойных условий в ионосфере относительная погрешность определения начальной фазовой постоянной не превысила 3 %, а в случае плазменного кольца – 13 %, для ВПЭС относительная погрешность в спокойных условиях не превышала 7 %, при наличии плазменного кольца – 60 %. Большие значения относительной погрешности были в областях резкого изменения ВПЭС. Предложенная методика позволяет оценить вероятную погрешность при выборе положения приемных пунктов относительно друг друга, а также погрешности при выборе высоты перерасчета наклонного ПЭС в ВПЭС при рассмотрении интересующей ситуации в ионосфере.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : Ин-т солнечно-земной физики СО РАН : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006а. 480 с.
- Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Первалова Н. П., Ратовский К. Г. Крупномасштабные возмущения аврорального происхождения во время магнитных бурь 29–31 октября 2003 г. и 7–11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов // Геомагнетизм и аэрономия. 2006б. Т. 46, № 5. С. 637–642. EDN: HVJFKR.
- Брюнелли Б. Е., Чернышев М. Ю., Черняков С. М. Широтные профили полного электронного содержания в авроральной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 5. С. 82–87.
- Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М. : Наука, 1967. 683 с.
- Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. В 2-х т. Т. 2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. М. : Мир, 1981. 317 с.
- Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : Физматлит, 2007. 336 с.
- Пронин В. Е., Пилипенко В. А., Захаров В. И., Мюрр Д. Л. [и др.]. Отклик полного электронного содержания ионосферы на конвективные вихри // Космические исследования. 2019. Т. 57, № 2. С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0023420619020079>. EDN: YVCKZV.
- Терещенко Е. Д. Радиоголографический метод исследования ионосферных неоднородностей. Апатиты : Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1987. 99 с.
- Терещенко Е. Д., Черняков С. М., Юрик Р. Ю., Ритвельд М. Т. [и др.]. Измерение полного электронного содержания в возмущенной мощным коротковолновым полем ионосфере методами некогерентного рассеяния радиоволн и радиопросвечивания сигналами спутников ГЛОНАСС // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 10. С. 747–758. EDN: JFILCX.

- Черняков С. М. Оперативный контроль состояния ионосферы с использованием адаптивной модели ионосферы на основе данных по полному электронному содержанию // Вестник МГТУ. 2004. Т. 7, № 1. С. 88–89. EDN: ИУСМР.
- Черняков С. М., Терещенко Е. Д., Куницын В. Е., Брюнелли Б. Е. Полное электронное содержание в авроральной и субавроральной ионосфере по данным радиопросвечивания навигационных ИСЗ // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32, № 4. С. 94–99.
- Черняков С. М., Шульгина Н. В. Сопоставление изменений профиля вертикального электронного содержания с данными наземных наблюдений в высоких широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. 1995. Т. 35, № 6. С. 102–108.
- Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Живетьев И. В., Косоголов Е. А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки с и т классов в январе – феврале 2010 г. // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 2. С. 125–135. DOI: <https://doi.org/10.7868/s002342061301010x>. EDN: PVWZXX.
- Belakhovsky V. B., Jin Y., Miloch W. Influence of the substorm precipitation and polar cap patches on GPS signals at high latitudes // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 6. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144>. EDN: LKPJUE.
- Chernyakov S. M., Tereshchenko E. D., Brunelli B. E., Nygrén T. Comparison of ionospheric total electron content measured using the difference Doppler and incoherent scatter methods // Annales Geophysicae. 1993. Vol. 11. P. 10–16.
- Ge H., Li B., Jia S., Nie L. [et al.]. LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): Progress, opportunities, and challenges // Geo-spatial Information Science. 2022. Vol. 25, Iss. 1. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978277>.
- Jin S., Gao C., Yuan, L., Guo P. [et al.]. Long-term variations of plasmaspheric total electron content from topside GPS observations on LEO satellites // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, Iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13040545>.
- Leitinger R., Schmidt G., Tauriainen A. An evaluation method combining the differential Doppler measurements from two stations that enables the calculation of the electron content of the ionosphere // Zeitschrift für Geophysik. 1975. Vol. 41, Iss. 2. P. 201–213.
- Migoya-Orué Y., Nava B., Radicella S., Alazo-Cuartas K. GNSS derived TEC data ingestion into IRI 2012 // Advances in Space Research. 2015. Vol. 55, Iss. 8. P. 1994–2002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.033>.
- Narayana Rao N., Klobuchar J. A. Comparison of ionospheric electron content observations at different stations // Journal of Geophysical Research. 1968. Vol. 73, Iss. 19. P. 6373–6378. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA073i019p06373>.
- Ratcliffe J. A. Some regularities in the F2 region of the ionosphere // Journal of Geophysical Research. 1951. Vol. 56, Iss. 4. P. 487–507. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ056i004p00487>.

## References

- Afraimovich, E. L., Perevalova, N. P. 2006a. GPS-monitoring of the upper Earth atmosphere. Irkutsk. (In Russ.)
- Afraimovich, E. L., Voeikov, S. V., Perevalova, N. P., Ratovsky, K. G. 2006b. Large-scale disturbances of auroral origin during magnetic storms on October 29–31, 2003 and November 7–11, 2004 according to GPS and ionosondes data. *Geomagnetism and Aeronomy*, 46(5), pp. 637–642. EDN: HVJFKR. (In Russ.)
- Brunelli, B. E., Chernyshev, M. Yu., Cherniakov, S. M. 1992. Latitudinal profiles of total electron content in the auroral ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 32(5), pp. 82–87. (In Russ.)
- Ginzburg, V. L. 1967. Propagation of electromagnetic waves in plasma. Moscow. (In Russ.)
- Ishimaru, A. 1981. Wave propagation and scattering in random media. Moscow. (In Russ.)
- Kunitsyn, V. E., Tereshchenko, E. D., Andreeva, E. S. 2007. Radio tomography of the ionosphere. Moscow. (In Russ.)
- Pronin, V. E., Pilipenko, V. A., Zakharov, V. I., Murr, D. L. et al. 2019. Response of the total electron content of the ionosphere to convective vortices. *Cosmic Research*, 57(2), pp. 83–92. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s0023420619020079>. EDN: YVCKZV.
- Tereshchenko, E. D. 1987. Radioholographic method for the study of ionospheric irregularities. Apatity. (In Russ.)
- Tereshchenko, E. D., Cherniakov, S. M., Yurik, R. Yu., Rietveld, M. T. et al. 2020. Total electron content measurements in the ionosphere disturbed by high-power high-frequency waves by the methods of incoherent scattering of radio waves and radio sounding by GLONASS satellite signals. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 62(10), pp. 667–676. (In Russ.) EDN: JFILCX.
- Cherniakov, S. M. 2004. Operating control of the ionosphere condition using an adaptive model of the ionosphere based on total electron content data. *Vestnik of MSTU*, 7(1), pp. 88–89. (In Russ.) EDN: ИУСМР.
- Cherniakov, S. M., Tereshchenko, E. D., Kunitsyn, V. E., Brunelli, B. E. 1992. Total electron content in the auroral and subauroral ionosphere according to the radio sounding of navigational ASE. *Geomagnetism and Aeronomy*, 32(4), pp. 94–99. (In Russ.)
- Cherniakov, S. M., Shulgina, N. V. 1995. Comparison of changes in the profile of vertical electron content with data of ground observations at high latitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*, 35(6), pp. 102–108. (In Russ.)

- Yasyukevich, Yu. V., Voeikov, S. V., Zhivetiev, I. V., Kosogorov, E. A. 2013. Ionosphere response to class c and m solar flashes in January – February 2010. *Cosmic research*, 51(2), pp. 125–135. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7868/s002342061301010x>. EDN: PVWZXX.
- Belakhovsky, V. B., Jin, Y., Miloch, W. 2020. Influence of the substorm precipitation and polar cap patches on GPS signals at high latitudes. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17(6), pp. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-139-144>. EDN: LKPJUE.
- Chernyakov, S. M., Tereshchenko, E. D., Brunelli, B. E., Nygrén, T. 1993. Comparison of ionospheric total electron content measured using the difference Doppler and incoherent scatter methods. *Annales Geophysicae*, 11, pp. 10–16.
- Ge, H., Li, B., Jia, S., Nie, L. et al. 2022. LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): Progress, opportunities, and challenges. *Geo-spatial Information Science*, 25(1), pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978277>.
- Jin, S., Gao, C., Yuan, L., Guo, P. et al. 2021. Long-term variations of plasmaspheric total electron content from topside GPS observations on LEO satellites. *Remote Sensing*, 13(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13040545>.
- Leitinger, R., Schmidt, G., Tauriainen, A. 1975. An evaluation method combining the differential Doppler measurements from two stations that enables the calculation of the electron content of the ionosphere. *Zeitschrift für Geophysik*, 41(2), pp. 201–213.
- Migoya-Orué, Y., Nava, B., Radicella, S., Alazo-Cuartas, K. 2015. GNSS derived TEC data ingestion into IRI 2012. *Advances in Space Research*, 55(8), pp. 1994–2002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.033>.
- Narayana, Rao N., Klobuchar, J. A. 1968. Comparison of ionospheric electron content observations at different stations. *Journal of Geophysical Research*, 73(19), pp. 6373–6378. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA073i019p06373>.
- Ratcliffe, J. A. 1951. Some regularities in the F2 region of the ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 56(4), pp. 487–507. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ056i004p00487>.

#### Сведения об авторах

**Черняков Сергей Михайлович** – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010;  
Полярный геофизический институт, науч. сотрудник; e-mail: [smcherniakov@gmail.com](mailto:smcherniakov@gmail.com),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>

**Sergei M. Cherniakov** – 15 Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute,  
Researcher; e-mail: [smcherniakov@gmail.com](mailto:smcherniakov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8554-6744>