

Оценка вертикального полного электронного содержания ионосферы по данным двухчастотных навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС

В. А. Иванов¹, Н. В. Рябова¹, Д.В. Иванов¹, М. И. Рябова¹, А. А. Кислицын¹, А. В. Зуев¹, Ю.В. Ясюкевич²

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет» пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, RyabovaMI@volgatech.net

2. Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) (Российская Федерация, Иркутск). ул. Лермонтова, д. 126а, г. Иркутск, Иркутская область, 664033, yasukevich@iszf.irk.ru

Представлена развитая методика и алгоритм определения абсолютного полного электронного содержания по данным приемников GPS/ГЛОНАСС. Анализируются особенности экспериментального суточного хода полного электронного содержания в ионосфере и хода, полученного с использованием международной справочной модели IRI-2012.

The developed technique and algorithm for determining the absolute total electron content according to individual receivers GPS / GLONASS. Analyzes the characteristics of the experimental diurnal variation of the total electron content in the ionosphere and the progress obtained using international reference model IRI-2012.

Введение.

Существенное влияние на распространение радионавигационного сигнала оказывает верхняя часть атмосферы Земли – ионосфера. Наиболее актуальным методом исследования структуры ионосферы и динамических процессов, протекающих в ней, является метод трансionoсферного зондирования сигналами спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, использующих два диапазона с центральными частотами около 1,2 и 1,6 ГГц.

Суть данного метода заключается в определении полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, которое в свою очередь, является основной характеристикой, определяющей изменение параметров радионавигационного сигнала. Восстановление ПЭС осуществляется путем анализа данных фазовых и групповых измерений псевдодалности на двух частотах.

Цель работы – развитие методики и алгоритма определения абсолютного вертикального полного электронного содержания на основе данных навигационных приемников GPS/ГЛОНАСС и оценка по ним суточного хода ПЭС.

Методика определения абсолютного значения полного электронного содержания.

Методика определения полного электронного содержания вдоль луча спутник-приемник с использованием фазовых и групповых измерений на двух частотах достаточно описана в литературе [1–4].

Хорошо известно, что ПЭС, полученное по групповым измерениям достаточно сильно зашумлено. Особенно значительно это проявляется на низких углах, где шумы измерений могут достигать более 100 % [5]. При этом с точностью до ошибки, связанной с DCB, групповые измерения ПЭС являются абсолютными.

Фазовые измерения характеризуются значительно меньшим шумом, однако, вследствие неоднозначности измерения фазы, они позволяют получать только вариации ПЭС вдоль луча спутник приемник.

Таким образом, для вычисления абсолютного вертикального ПЭС был разработан алгоритм, основанный на одновременном использовании фазовых и групповых измерений ПЭС и простой модели измерений ПЭС, учитывающей дифференциальные кодовые задержки [6]

Алгоритм имеет следующую структуру:

- 1) разделение рядов данных на непрерывные интервалы по времени;
- 2) детектирование и устранение выбросов и срывов сопровождения сигнала;
- 3) вычисление неоднозначности фазовых измерений и ПЭС, осуществляемого на основе усреднения разности фазовых и групповых измерений;
- 4) задание модели измерений и вычисление параметров этой модели на основе экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Используемая нами модель измерений имеет вид (1). Параметрами модели могут являться вертикальное ПЭС, широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС.

$$I_M = S_j^i (I_V + G_{Lon} \cdot \Delta Lon_j^i + G_{q_Lon} \cdot (\Delta Lon_j^i)^2 + G_{Lat} \cdot \Delta Lat_j^i + G_{q_Lat} \cdot (\Delta Lat_j^i)^2 + G_t \cdot \Delta t_j^i + G_{q_t} \cdot (\Delta t_j^i)^2) + I_{BIAS_j} \quad (1)$$

где i отмечает номер измерения,

j – номер спутника GPS или ГЛОНАСС;

I_V , - абсолютное значение вертикального ПЭС;

G_{Lon} , G_{Lat} , G_{q_Lon} , G_{q_Lat} – линейные и квадратичные члены пространственных градиентов ПЭС по широте (Lon) и долготе (Lat);

ΔLon , ΔLat – расстояние по широте и долготе между подионосферной точкой и станцией;

G_t , G_{q_t} – временная первая и вторая производная ПЭС;

Δt – разница по времени между текущим временем и серединой анализируемого интервала.

Оценка параметров модели осуществлялась по данным двухчасовых интервалов. Начало каждого интервала сдвинуто относительно предыдущего на полчаса.

Результаты вычислительного эксперимента.

Адекватность результатов и выводов планируется проверить путем сопоставления их с данными GIM лаборатории CODG и данными моделирования с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2012.

Для решения задач распространения радиоволн в трансionoсферном канале связи и прогнозирования основных его характеристик широкое распространение получили эмпирические модели ионосферы. Наибольшую известность имеет международная справочная модель ионосферы IRI-2012 (International Reference of Ionosphere) (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html), признанной URSI (International Union of Radio Science) в качестве эталона для оценки ионосферных параметров, позволяющая проводить долгосрочные прогнозы в любой точке на Земле [4].

На основе проведенных исследований по модели IRI был разработан алгоритм построения суточных ходов ПЭС (рис. 1).

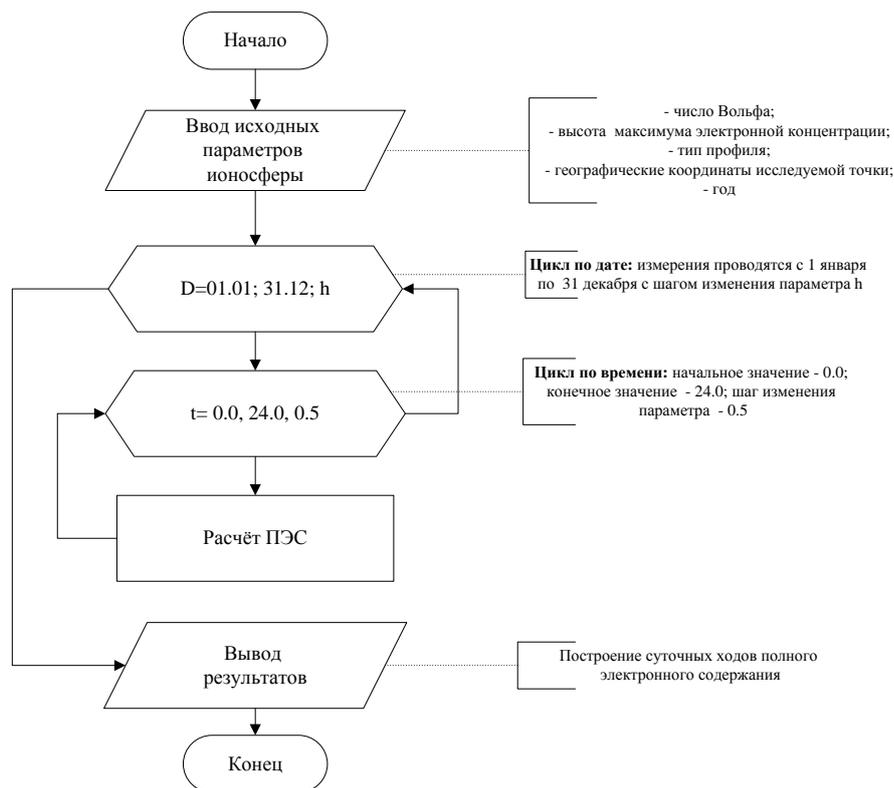


Рис. 1. Алгоритм построения суточных ходов ПЭС по модели IRI

Динамика ПЭС над г. Йошкар-Олой в 2012 г.

Для анализа нами были использованы данные наблюдений в г. Йошкар-Оле за 22 дня 2012 г., для которых имелись непрерывные суточные измерения GPS/ГЛОНАСС. В таблице представлены анализируемые дни, максимальное значение K_p за сутки, максимальное и минимальное значение ПЭС, полученное на основе изложенной методики, а также среднеквадратичное отклонение (СКО) ПЭС, полученного на основе разных методик: по данным сети станций, полученных лабораторией CODG, и по данным отдельного приемника GPS/ГЛОНАСС.

Геомагнитная возмущенность, а также максимальные и минимальные значения ПЭС за сутки

дата	день года	$K_{p\text{ макс}}$	$\text{ПЭС}_{\text{мин}}, \text{TECU}$	$\text{ПЭС}_{\text{макс}}, \text{TECU}$	СКО
21 января	21	2,3	0,7	19,0	1,6
22 января	22	4,7	1,3	22,7	3,7
29 января	29	2,7	1,9	17,9	0,6
31 января	31	1,3	3,5	18,9	1,0
21 марта	81	2,3	3,3	18,6	1,6
31 марта	91	2,3	4,6	24,8	2,8
7 апреля	98	3,3	2,6	24,0	2,1
8 апреля	99	2,3	0,6	23,9	1,8
30 мая	151	2,3	14,6	23,6	4,6
2 июня	154	3,7	9,5	23,6	4,7
17 июня	169	6	7,3	17,9	2,8

24 июня	176	1,7	7,4	16,5	3,2
25 июня	177	3,3	6,1	22,8	2,8
26 июня	178	2,7	6,2	14,0	3,4
31 октября	305	2,3	4,1	23,0	1,8
2 ноября	307	2,3	3,3	20,0	1,4
27 ноября	332	1,3	0,5	13,9	1,4
29 ноября	334	1,3	3,6	12,9	1,7
13 декабря	348	1,7	1,4	13,6	1,5
22 декабря	357	0,3	3,4	11,3	1,3
23 декабря	358	1	3,4	10,9	1,0
27 декабря	362	0,7	2,7	10,9	1,0

На рис. 2–3 представлены данные вертикального полного электронного содержания над г. Йошкар-Ола в зимний (рис. 2, а), весенний (рис. 2, б), летний (рис. 3, а), осенний (рис. 3, б) периоды. Красной кривой – результаты, полученные на основе экспериментальных данных GPS/ГЛОНАСС для Йошкар-Олинской станции YOSH. Синей кривой приведены данные вертикального ПЭС лаборатории CODG, полученные на сети станций GPS/ГЛОНАСС. Черной кривой приведены модельные данные, полученные на основе международной справочной модели ионосферы IRI-2012 (<http://iri.gsfc.nasa.gov/>).

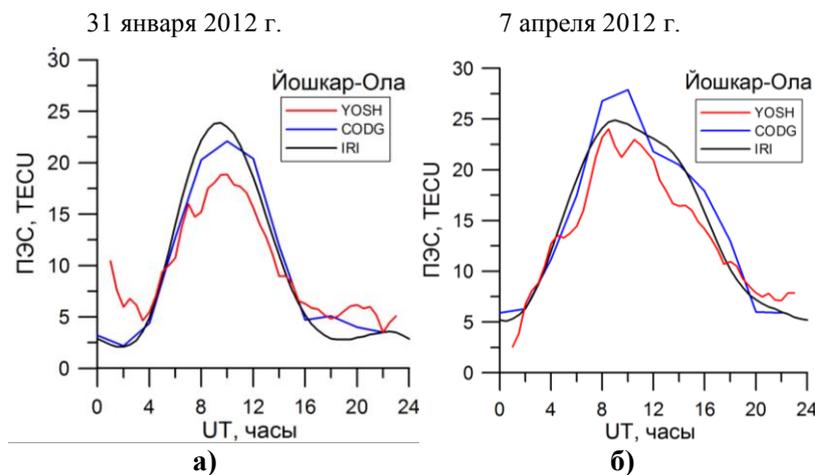


Рис. 2. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Йошкар-Олой 31 января и 7 апреля 2012 г. Красная кривая – экспериментальные результаты, синяя кривая – данные CODG, черная кривая – данные модели IRI-2012.

На основе полученных нами результатов можно сделать следующие выводы: наблюдается полуденный максимум во временном интервале 13–15 часов локального времени, с явно выраженным переходом к ночной ионосфере в вечернее время. В летние месяцы перепад дневных и ночных значений становится менее выраженным.

Для всех сезонов можно отметить достаточно близкое подобие общей формы хода ПЭС по экспериментальным и модельным данным. Можно отметить, что в дневное время, полученные нами значения оказываются несколько ниже модельных значений и данных CODG. В вечернее и ночное время согласие несколько лучше.

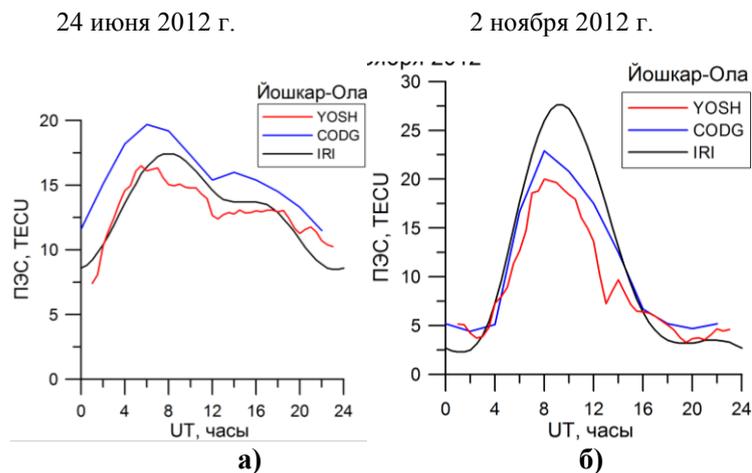


Рис. 3. Суточный ход абсолютного ПЭС над г. Йошкар-Олой (справа) 24 июня и 2 ноября 2012 г. Красная кривая – экспериментальные результаты, синяя кривая – данные CODG, черная кривая – данные модели IRI-2012

Кроме того, стоит отметить слабое проявление в экспериментальных данных CODG ночного увеличения ПЭС, заложенного в модель (см. рис. 2–3). Полученные нами данные демонстрируют подобное увеличение, но оно выражено не достаточно сильно по сравнению с моделью.

Заключение.

Разработанная методика позволяет определять вертикальное ПЭС по данным отдельных приемников GPS/ГЛОНАСС. Полученная динамика ПЭС качественно согласуется с динамикой ПЭС по данным лаборатории CODG, а также модельной динамикой ПЭС. При этом имеет место превышение данных CODG над данными, полученные на основе описанной методики. Наиболее сильное различие отмечается для дневного времени. Имеет место достаточно хорошее соответствие экспериментальных данных, а также модельных данных IRI-2012.

Литература

1. Афраимович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраимович, Н.П. Первалова. – Иркутск: Изд. во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – 480 с.
2. Hofmann-Wellenhof В. Global Positioning System: Theory and Practice / В. Hofmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger, J. Collins. – New York. Springer-Verlag Wien. –1992. – 327 p.
3. Иванов, В.А. Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы/ В.А. Иванов, А.Ю. Желонкин, Н.В. Рябова, А.В. Зуев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 1. – С.24-30.
4. Иванов, В. А. Экспериментальное определение полного электронного содержания в ионосфере над Йошкар-Олой с использованием технологий ГЛОНАСС/GPS / В. А. Иванов, Н.В. Рябова, М. И. Рябова А.А. Кислицын // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: материалы IV Всероссийской научной конференции (III Всероссийские Армандовские чтения). – Муром: Изд. полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013. – С. 101-105.
5. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. – М.: Физматлит, 2007. – 255с.
6. Ясюкевич, Ю. В. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 / Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В.В. Демьянов, В. А. Иванов, Н. В.

Рябова, А. В. Зуев, М.И. Рябова, А. А. Кислицын // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 3(19). – С. 18-29