

# **Методы и программные средства для нахождения полного электронного содержания над территорией Республики Беларусь**

*Наумов А.О., к. физ.-мат. н., Институт прикладной физики  
НАН Беларуси, зав. сектором, г. Минск, Белоруссия*

SPIN код: 4761-4951

*Котов Д.С., к. т. н., УП «Геоинформационные системы» НАН  
Беларуси, ученый секретарь, г. Минск, Белоруссия*

## **Аннотация**

Исследуются методы определения полного электронного содержания в ионосфере по сигналам глобальной навигационной системы GPS. Предложены и реализованы методы для устранения фазовой неоднозначности за счет «проскальзывания циклов» и определения дифференциальных кодовых задержек. Разработано программное обеспечение для нахождения полного электронного содержания и построения карт вертикального полного электронного содержания над территорией Республики Беларусь.

## **Введение**

Актуальность изучения происходящих в ионосфере процессов обусловлена тем, что пространственные и временные неоднородности электромагнитного поля в верхних слоях атмосферы Земли играют важную роль в функционировании современных технологических систем. Например, поддержание работоспособности аппаратуры, установленной на борту спутников, точность определения местоположения объектов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем, характеристики распространения радиоволн, работа наземных электрогенерирующих, электрических и трубопроводных систем зависят от знания состояния верхней атмосферы на ионосферных высотах.

Одним из наиболее эффективных средств исследования ионосферы является радиозондирование с использованием высокоорбитальных навигационных спутников. В настоящее время на территории

Республики Беларусь находится сеть из 96 постоянно действующих пунктов спутниковой системы точного позиционирования (ССТП РБ), которые можно использовать для проведения измерений. Данные с этих станций позволяют вычислять полное электронное содержание (ПЭС) которое описывает число электронов на линии, соединяющей спутник с наземной приемной станцией. На основании ПЭС находятся вертикальные полные электронные содержания (ВПЭС), характеризующие интегральную концентрацию электронов в вертикальном столбе над заданной точкой земной поверхности.

## 1. Методы нахождения ПЭС и ВПЭС

Прохождение электромагнитных сигналов через ионосферу зависит от концентрации свободных электронов в ней. Кроме того, влияние ионосферы на радиосигналы зависит от частоты сигнала, т. е. ионосфера является диспергирующей средой. Этот эффект изменяет скорость распространения сигналов по отношению к скорости света из-за наличия показателя преломления, отличного от 1. В зависимости от того, рассматривается ли группа или фаза сигнала, эти показатели преломления будут различаться. Их связывает следующее выражение [1]:

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df}, \quad (1)$$

где:

$n_{gr}$  и  $n_{ph}$  — показатели преломления для группового и фазового сигналов;

$f$  — частота сигнала.

Полное электронное содержание определяется как интеграл электронной плотности вдоль пути между спутником и приемной станцией

$$\text{ПЭС} = \int_S n_e(s) ds. \quad (2)$$

Оно выражается в единицах TEC Units (TECU), где 1TECU определяется как  $10^{16}$  электронов, содержащихся в цилиндре с поперечным сечением  $1 \text{ м}^2$ , совмещенном с траекторией луча. ПЭС может быть

вычислено как по разности между псевдодальностями  $P_1$  и  $P_2$ , так и по разности между фазами  $L_1$  и  $L_2$  по следующим формулам [2]:

$$\text{ПЭС}_{gr} = \frac{1}{40,28} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_2 - P_1 + c(D_r + D_s)]; \quad (3)$$

$$\text{ПЭС}_{ph} = \frac{1}{40,28} \left( \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [\lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2 - N + c(D_r + D_s)], \quad (4)$$

где:

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, соответствующие частотам  $f_1$  и  $f_2$ ;

$c$  — скорость света в вакууме;

$N$  — фазовая неоднозначность за счет целого числа длин волн на дистанции измерений;

$D_s$  и  $D_r$  — дифференциальные кодовые задержки в апертуре спутника и приемника.

Расчеты ПЭС проводились с так называемой негеометрической линейной комбинацией двух частот  $L_1$  и  $L_2$ , которая содержит только ионосферную информацию. ПЭС, полученное из фазовых измерений, более сглажено, чем полученное по кодовым измерениям. Для фазовых измерений дополнительно необходимо устранение начальной фазовой неоднозначности, связанной с проскальзыванием цикла. Для этого использовался метод, описанный в [3].

Для ряда задач величина ПЭС не очень удобна, так как: во-первых, она сильно зависит от угла возвышения спутника, а, во-вторых, она не может быть отнесена к какой-либо конкретной точке пространства. Более удобна величина, которая называется вертикальным полным электронным содержанием и определяется как интегральная концентрация электронов в вертикальном столбе над поверхностью Земли. Для этого выбирается некоторая высота  $h$ , в которой находится центр тяжести электронной концентрации. Точка на этой выбранной высоте называется ионосферной точкой проникновения или Ionospheric Pierce Point (IPP) и задается как точка на луче, соединяющем спутник с приемником на выбранной высоте над поверхностью Земли. В последующих расчетах эта высота задавалась равной  $h = 504$  км. ВПЭС рассчитывается по значениям ПЭС с помощью формулы:

$$\text{ВПЭС} = \text{ПЭС} \cdot \cos \chi,$$

где  $\chi$  — угол возвышения спутника.

Для оценки дифференциальных кодовых задержек  $D_s$  и  $D_r$  использован метод, основанный на работе [4]. Задержки спутника  $D_s$  и приемника  $D_r$  считаются неизвестными параметрами, которые вычисляются с использованием метода наименьших квадратов по значениям вертикального полного электронного содержания.

## **2. Программные средства нахождения ПЭС и ВПЭС над территорией Республики Беларусь**

Программные средства обработки радиотомографических данных высокоорбитального контроля ионосферы обеспечивают реализацию методов и алгоритмов получения, обработки и хранения данных о состоянии ионосферы над территорией Республики Беларусь и сопредельных государств, полученных на основе радиосигналов от высокоорбитальных навигационных спутниковых систем, фиксируемых спутниковой системой точного позиционирования Республики Беларусь (ССТП РБ). Программные средства войдут в состав космической системы радиометрического контроля околоземного пространства на базе МКА и специализированных наземных средств, которая позволит повысить уровень безопасности эксплуатации сложных инфраструктурных объектов на территории Республики Беларусь.

Программные средства написаны на языке программирования Python версии 3.10, с использованием сторонних кроссплатформенных свободных библиотек: Matplotlib, NumPy, Plotly, SciPy, georinex, Pandas, rump3d, Xarray, PyKrige, GeoPandas.

На рис. 1 представлены значения полных электронных содержаний до устранения проскальзывания циклов, полученные по фазовым псевдодальностям сигналов GPS спутников за 5 мая 2022 г., в промежутке времени: от 00:00:00 до 01:00:00 Всемирного координированного времени. На рис. 2 представлены эти же значения после устранения проскальзывания циклов. Видно, что выбросы, связанные с проскальзыванием, эффективно устраняются использованным алгоритмом.

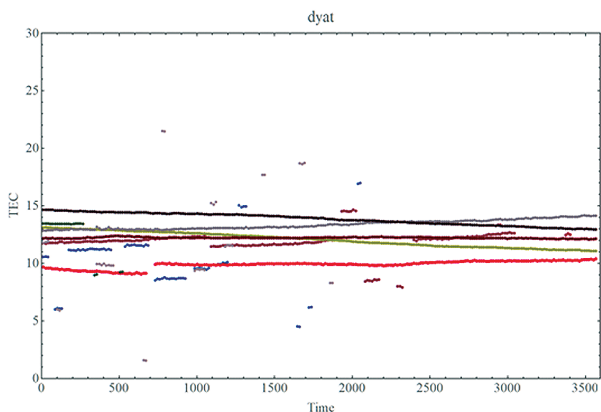


Рис. 1. Значения электронных содержаний до устранения проскальзывания циклов

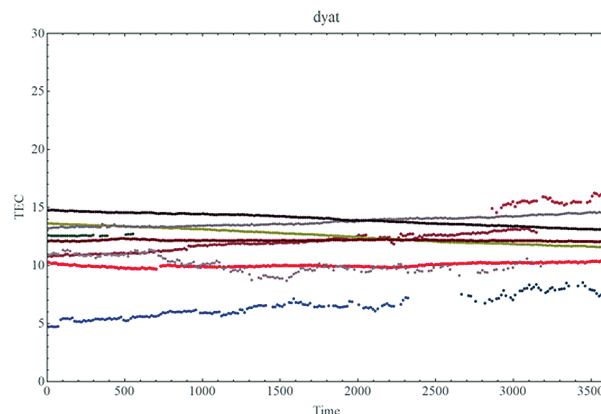


Рис. 2. Значения электронных содержаний после устранения проскальзывания циклов

В качестве примера работы алгоритма определения дифференциальных кодовых задержек приведем результаты расчета полного электронного содержания по данным от 5 мая 2022 года со станции наблюдения «bori», расположенной в городе Борисове. На рис. 3 представлены значения полных электронных содержаний до коррекции дифференциальных кодовых задержек по всем 32-м GPS спутникам. На рис. 4 представлены эти же значения после коррекции дифференциальных кодовых задержек.

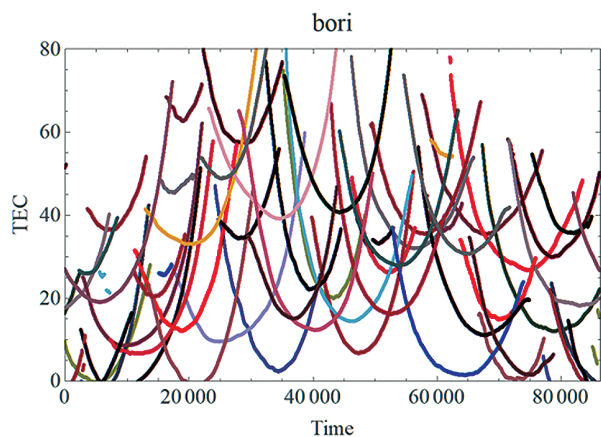


Рис. 3. Значения ПЭС до коррекции дифференциальных кодовых задержек

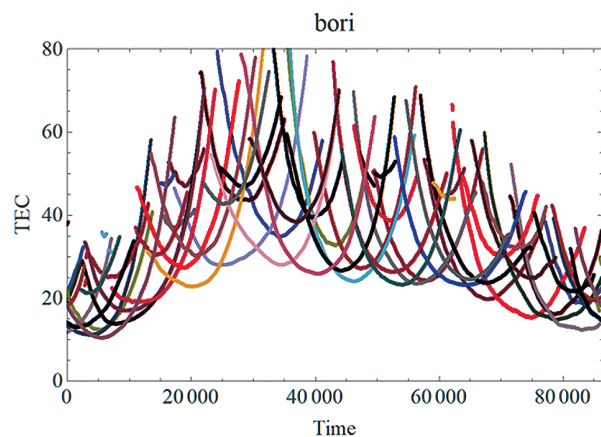


Рис. 4. Значения ПЭС после коррекции дифференциальных кодовых задержек

Пример расчета вертикального полного электронного содержания в различные моменты времени 05 мая 2022 года по данным 15 станций наблюдения и спутников системы GPS представлен на рис. 5.



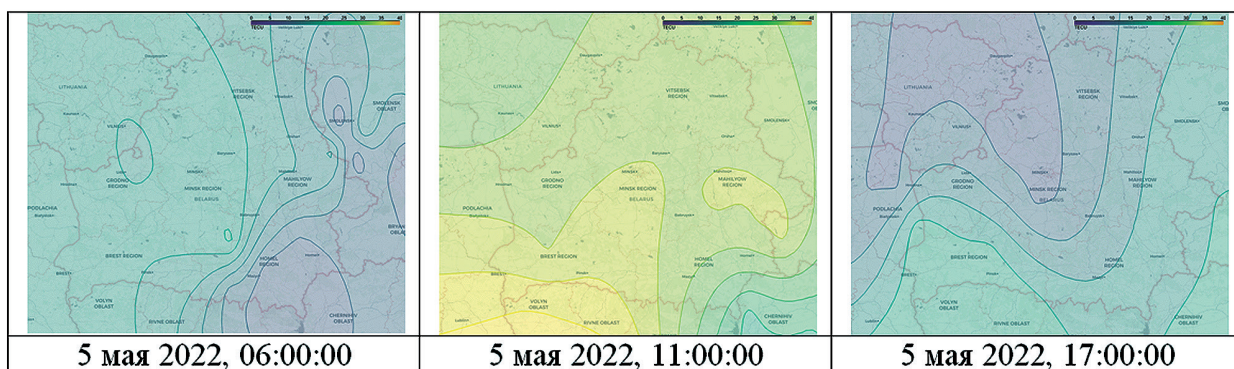


Рис. 5. Пример расчета вертикального полного электронного содержания над территорией Республики Беларусь

### Список использованных источников

1. Davies K. Ionospheric Radio / K. Davies.— The Institution of Engineering and Technology, 1990. 600 p.
2. B. Hofmann-Wellenhof. GNSS. Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer, Berlin, Germany, 2008. P. 546.
3. G. Blewitt. An Automatic Editing Algorithm for GPS data. 1990. P. 199–202.
4. Choi B. K., Cho J. H., Lee S. J. Estimation and analysis of GPS receiver differential code biases using KGN in Korean Peninsula // Advances in Space Research. 2011. Vol. 47, no. 9. P. 1590–1599.