

Определение полного электронного содержания ионосферы над станцией «Восток» по ГНСС-наблюдениям

© Д. А. Трофимов¹, С. Д. Петров¹, Ю. А. Серов², И. В. Чекунов³, С. С. Смирнов¹,
А. С. Гришина¹, К. В. Желтова¹, О. А. Трошичев²

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУ «ААНИИ», г. Санкт-Петербург, Россия

³МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия

Реферат

Распространение радиоизлучения сквозь земную ионосферу в настоящее время представляет серьезную проблему с точки зрения обработки радиотехнических измерений в космической геодезии. С другой стороны, наличие двух независимых частотных каналов у современных навигационных приемников геодезического класса позволяет достаточно точно оценивать параметры ионосферы, определяющие распространение через нее радиоволн. Соответственно, долговременные геодезические ГНСС-измерения дают данные о состоянии полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Поэтому авторам представлялось интересным отработать методику определения ПЭС.

Наблюдения выполнялись на антарктической станции «Восток», расположенной вблизи южного геомагнитного полюса Земли. Для производства наблюдений был оборудован наблюдательный пункт, состоящий из столба, вмороженного в фирн, на верхнем торце которого размещается площадка с винтовой маркой для закрепления приемника, прикрытая радиопрозрачным куполом. На пункте был установлен приемник JAVAD Triumph-1. Проводились наблюдения как GPS, так и ГЛОНАСС, на двух частотах с временным разрешением 30 сек. Наблюдения проводились в два интервала: с 7 февраля 2016 г. по 31 января 2017 г. и с 4 февраля 2018 г. по 10 февраля 2019 г. ПЭС определялось только на основе кодовых измерений как для GPS, так и для ГЛОНАСС. Полученные результаты сравнивались с ионосферными картами CODE. Полученные авторами данные по ПЭС хорошо согласуются с данными CODE.

Обнаружено интересное явление, когда в ПЭС, вычисленному по GPS, в 2016 г. появились большие выбросы порядка 200–250 TECU, подобные выбросы отсутствуют в 2018 г. и в рядах ПЭС, полученных по ГЛОНАСС. Данное явление пока не получило надежного объяснения. При сравнении рядов ПЭС за 2016 и 2018 годы наблюдаются ожидаемые сезонные вариации. Ряды ПЭС, полученные по ГЛОНАСС и по GPS, хорошо согласуются между собой. Планируется возобновление наблюдений ориентировочно с февраля 2020 г.

Ключевые слова: ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, полное электронное содержание, ионосфера.

Контакты для связи: Трофимов Дмитрий Александрович (dm.trofimov@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 13.12.2020, принята к публикации 27.12.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Трофимов Д. А., Петров С. Д., Серов Ю. А., Чекунов И. В., Смирнов С. С., Гришина А. С., Желтова К. В., Трошичев О. А. Определение полного электронного содержания ионосферы над станцией «Восток» по ГНСС-наблюдениям // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 68–71.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.68-71>

Determination of the Total Electronic Content of the Ionosphere over the Vostok Station Using GNSS Observations

D. A. Trofimov¹, S. D. Petrov¹, Yu. A. Serov², I. V. Chekunov³, S. S. Smirnov¹,
A. S. Grishina¹, K. V. Zheltova¹, O. A. Troshichev²

¹St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

²Federal State Budgetary Institution “Arctic and Antarctic Research Institute”, Saint Petersburg, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract

The propagation of radio emission through the Earth's ionosphere is currently a serious problem in terms of processing radio engineering measurements in space geodesy. On the other hand, the presence of two independent frequency channels in modern navigation receivers of the geodetic class allows a fairly accurate estimate of the ionosphere parameters that determine the propagation of radio waves through it. Accordingly, the performance of long-term geodetic GNSS measurements is simultaneously sounding the ionosphere; it thus seemed interesting to work out a methodology for determining the total electronic content of the ionosphere (TEC).

Observations were performed at the Vostok Antarctic station, located near the Earth's south geomagnetic pole. For making observations, an observation point was set up, consisting of a column frozen in a firn, on the upper end of which there is a platform with a screw mark for fixing the receiver, covered by a radio-transparent dome. The JAVAD Triumph-1 receiver was installed at the site. Both GPS and GLONASS were observed at two frequencies with a time resolution of 30 seconds.

The observations were carried out in two intervals, from February 7, 2016 to January 31, 2017 and from February 4, 2018 to February 10, 2019. TEC was determined only on the basis of code measurements for both GPS and GLONASS. The results were compared with CODE ionospheric maps. Our TEC data are in good agreement with the CODE data.

An interesting phenomenon was discovered when large emissions of about 200–250 TECU appeared in GPS-calculated TECs in 2016, with similar emissions being absent in 2018 and in the GLONASS-based TECs. This phenomenon has not yet received a reliable explanation. When comparing the TEC series for 2016 and 2018, the expected seasonal variations are observed. The TEC series obtained by GLONASS and GPS are in good agreement with each other. It is planned to resume observations approximately since February 2020.

Keywords: GNSS, GPS, GLONASS, total electronic content, ionosphere.

Contacts: Dmitriy Trofimov (dm.trofimov@gmail.com).

Received December 13, 2020, *accepted* December 27, 2019, *published* May 12, 2020.

For citation: Trofimov D. A., Petrov S. D., Serov Yu. A., Chekunov I. V., Smirnov S. S., Grishina A. S., Zheltova K. V., Troshichev O. A. Determination of the total electronic content of the ionosphere over the Vostok station using GNSS observations // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 68–71.

<https://doi.org/10.32876/IAAstron.52.68-71>

Введение

Определение параметров ионосферы является важной научной задачей, в частности, ионосфера отражает волны коротковолнового диапазона, что позволяет поддерживать в нем радиосвязь на больших расстояниях. Ионосфера – слой атмосферы Земли, сильно ионизированный вследствие облучения Солнцем. Ионосфера Земли состоит из смеси нейтральных газов (в основном азот и кислород) и квазинейтральной плазмы (число отрицательно заряженных частиц примерно равно числу положительно заряженных). Ионосфера начинается примерно с высоты 60 км.

Одной из главных характеристик состояния ионосферы является полное электронное содержание (ПЭС, в англоязычной литературе – TEC, Total electron content) – количество свободных электронов, находящихся в цилиндре сечением 1 м^2 , ориентированном вдоль луча зрения. Данная величина измеряется в TECU (Total Electron Content Unit – единица полного электронного содержания), $1 \text{ TECU} = 1 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

ПЭС определяется по задержке радиосигнала, проходящего через ионосферу. Передача сигнала на двух частотах позволяет учесть данный эффект, что используется в РСДБ и ГНСС. В настоящий момент времени ГНСС является наиболее удобной технологией для определения ПЭС, так как приемная аппаратура самая дешевая среди аналогов, а созвездия имеющихся систем ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и Baidou) обеспечивают достаточно плотное покрытие небесной сферы для наблюдателя. Для ГНСС ПЭС можно получить исходя из методики, описанной в [1].

К настоящему времени выполнено уже достаточно много работ [2–4] по определению ПЭС над Антарктидой. Как правило, все работы выполнялись на основе наблюдений ГНСС либо на основе измерений сигнала спутниковых альтиметрических миссий. Вместе с тем необходимо отметить следующий существенный недостаток данных ра-

бот, органически вытекающий из условий их проведения: практически все наблюдательные пункты, на которых установлены ГНСС-приемники, расположены на побережье Антарктиды, в то время как территория внутриконтинентальной Антарктиды подобными исследованиями не охвачена. На территории внутриконтинентальной Антарктиды одним из наиболее удобных и интересных мест для установки ГНСС-приемника является российская антарктическая станция «Восток», расположенная вблизи южного геомагнитного полюса Земли.

Наблюдательные данные и результаты обработки

Для организации ГНСС-пункта на станции «Восток» кафедрой астрономии СПбГУ был предоставлен высокоточный двухчастотный геодезический ГНСС-приемник JAVAD TRIUMPH-1 с возможностью фазовых измерений. Приемник двухсистемный – ведется прием сигналов GPS и ГЛОНАСС. Для долговременного закрепления пунктов были подготовлены металлические марки с винтовой резьбой.

В первых числах февраля 2016 г. по прибытии экспедиции на станцию «Восток» был оборудован пункт для установки приемной аппаратуры. С этой целью в фирн был вертикально заморожен брус $100 \times 100 \times 3000 \text{ мм}$, на котором оборудована площадка для установки приемника, а также размещения греющего кабеля и радиопрозрачного купола. С 7 февраля 2016 г. начались постоянные измерения на оборудованном пункте. Наблюдения на данном пункте продолжались непрерывно в течение года, до 31 января 2017 г., были пропущены наблюдения только 12 октября 2016 г. Интервал между измерениями – 30 сек.

На основе данных наблюдений были получены координаты пункта и его скорость [5–6]. Полученные скорости хорошо согласуются с ре-

зультатами спутниковых радарных измерений. После доставки приемника из Антарктиды, проверки его работоспособности, а также после обработки полного полученного ряда измерений, было принято решение о продолжении наблюдений на оборудованном пункте. Второй ряд наблюдений был начат 4 февраля 2018 г. и окончен 10 февраля 2019 г. Характеристики наблюдений те же самые, что в первом периоде: GPS, ГЛОНАСС, кодовые и фазовые, наблюдение один раз в 30 сек.

ПЭС вычислялось на основе только кодовых измерений, из линейной комбинации псевдодалностей, полученных на двух частотах для каждого спутника, вычислялось наклонное содержание электронов в ионосфере (вдоль луча зрения), после чего на основе картирующей функции, описанной в [1], определялось вертикальное содержание электронов в ионосфере для каждого спутника. Высота проводящего слоя бралась равной 350 км. Итоговый результат был получен простым усреднением. В программе, которая вычисляет значения ПЭС, заложено условие фильтрации заведомо ложных значений ПЭС (слишком больших и слишком маленьких), вертикальные ПЭС от спутников, не проходящие по этим условиям, не участвуют в выводе итогового значения ПЭС. Для проверки адекватности полученных нами результатов мы использовали данные глобальных ионосферных карт, представляемых CODE, очевидно, что наши результаты должны быть достаточно близки к ним.

Нам представлялось интересным сравнить результаты, полученные из наблюдений GPS и ГЛОНАСС, особенно учитывая тот факт, что наблюдения производились в крайне высоких широтах, в которых ГЛОНАСС должен работать лучше.

Из сравнения графиков видно, что ПЭС, посчитанный по ГЛОНАСС, очень хорошо согласуется с ПЭС, посчитанным по GPS, и они оба хорошо согласуются со значениями ПЭС, предоставляемыми CODE. В то же время, если убрать условие фильтрации заведомо ложных данных, то картина изменится. Станут заметны очень сильные выбросы, около 250 TECU, которые заметны летом 2016 г., в ряде ПЭС, полученном по GPS. В ряде, полученном по ГЛОНАСС, подобные выбросы отсутствуют. Также в ряде ПЭС, полученном из измерений 2018 г., подобные явления отсутствуют. В настоящее время мы не можем определить причины этих выбросов. Мы не нашли каких-либо корреляций по времени этих выбросов с геомагнитными событиями на станции «Восток». Наибольшее скопление выбросов приходится на период июня – августа 2016 г., который соответствует зиме в Южном полушарии, то есть самым суровым климатическим условиям. Возможно, причиной выбросов являются инструменталь-

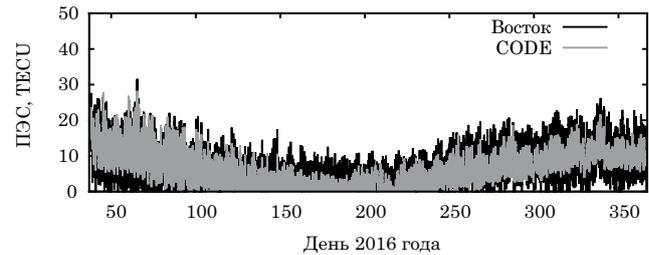


Рис. 1. Ряд ПЭС за 2016 г., полученный по результатам ГНСС-измерений на станции «Восток» (черная линия) в сравнении с рядом, рассчитанным на основе данных CODE (серая линия)

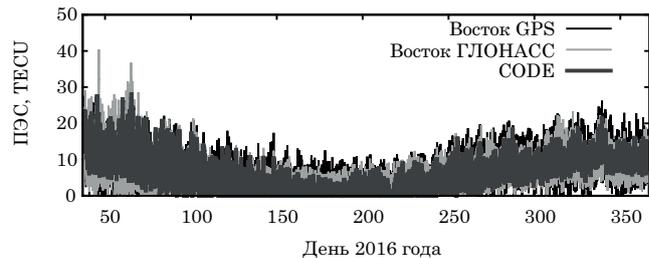


Рис. 2. Ряд ПЭС за 2016 г., полученный по результатам GPS-измерений на станции «Восток» в сравнении с рядом, рассчитанным на основе ГЛОНАСС-измерений (там же)

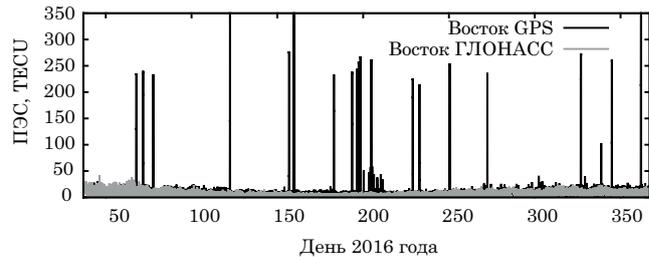


Рис. 3. Ряд ПЭС, полученный по результатам GPS-измерений, без условия отброса неправдоподобных значений на станции «Восток» в сравнении с рядом, рассчитанным на основе ГЛОНАСС-измерений (там же)

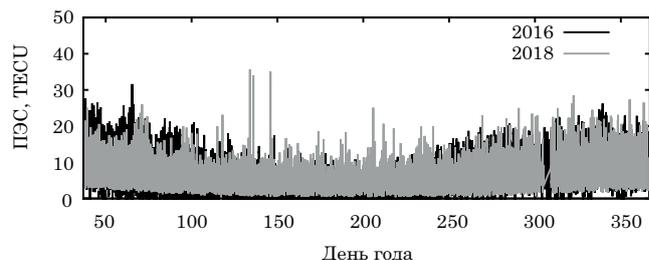


Рис. 4. Ряд ПЭС, полученный по результатам ГНСС-измерений на станции «Восток» в 2016 г. в сравнении с рядом, полученным по результатам ГНСС-измерений на станции «Восток» в 2018 г.

ные ошибки, правда, в этом случае непонятно, почему данных выбросов нет в рядах, полученных по ГЛОНАСС. Одним из возможных объяснений данных выбросов могут быть ионосферные сцинтилляции. Пока мы можем рассматривать данную ситуацию как подтверждение более высокой работоспособности системы ГЛОНАСС в высоких широтах. Разъяснение ситуации с ними требует дополнительных исследований и новых наблюдений.

Ряд за 2018 год обрабатывался так же, как и наблюдения 2016 года. Как было сказано выше,

в значениях ПЭС, полученных из наблюдений GPS за 2018 г., отсутствуют выбросы, аналогичные выбросам в 2016 г. В целом ряд за 2018 г. ведет себя аналогично ряду за 2016 г., отмечается понижение значений ПЭС летом, что соответствует зиме в южном полушарии и полярной ночи над наблюдательным пунктом. В то же время можно отметить некоторую меньшую «выгнутость» ряда 2018 г., типичные значения лета и зимы в 2018 г. отличаются меньше, чем типичные значения лета и зимы в 2016 г.

Заключение

На станции «Восток» авторами был оборудован наблюдательный ГНСС-пункт, уже использовавшийся для определения скорости движения ледникового покрова. На основе наблюдений, выполнявшихся в течение двух наблюдательных периодов в 2016–2017 гг. и 2018–2019 гг., получены ПЭС над станцией «Восток». Полученные ряды хорошо согласуются с данными, предоставляемыми CODE. В 2016 г. отмечены некоторые события, которые привели к выбросам в значениях ПЭС, определенных по GPS-измерениям. Одним из возможных объяснений данных событий могут быть

ионосферные сцинтилляции. Измерения на данном наблюдательном пункте будут продолжены.

Литература

1. *Alizadeh M. M., Wijaya D. D., Hobiger T. et al.* Ionospheric effects on microwave signals // *Atmospheric effects in space geodesy* / ed. by Böhm J., Schuh H. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 35–71.
2. *Sulaiman S., Ali M. A. M., Yatim B.* Ionospheric GPS-TEC observations at Scott base antarctica during 2004 // 2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Melaka, Malaysia. IEEE, 2007. P. 1–3.
3. *Purohit P., Bhawre D. P., Mansoori A. et al.* GPS derived total electron content (tec) variations over indian antarctica station, maitri // *World Acad. Sci., Eng. Technol.* 2011. Vol. 59. P. 597–599.
4. *Correia E., Paz A., Gende M.* Characterization of GPS total electron content (GPS-TEC) in Antarctica from 2004 to 2011 // *Annals of Geophysics.* 2013. Vol. 56, no. 2. P. 0217.
5. *Петров С. Д., Серов Ю. А., Чекунов И. В. и др.* Геодезические измерения на антарктической станции восток // Труды всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. С. 440–444.
6. *Трофимов Д. А., Серов Ю. А., Петров С. Д. и др.* ГНСС-наблюдения на станции «Восток» // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры, от идеи до внедрения: сборник материалов II Научно-практической конференции. СПб.: Политехника, 2017. С. 74–80.