

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ GPS**

¹Н.П. Перевалова, ¹Е.Б. Романова, ^{1,2}Д.Д. Каташевцева, ^{1,2}О.В. Тимофеева

**STUDY OF SPATIAL DISTRIBUTION OF TOTAL ELECTRON CONTENT
IN THE HIGH-LATITUDE IONOSPHERE BY GPS SATELLITES**

¹N.P. Perevalova, ¹E.B. Romanova, ^{1,2}D.D. Katashevvtseva, ^{1,2}O.V. Timofeyeva

В работе проведено исследование пространственного распределения полного электронного содержания (ПЭС) в высокоширотной ионосфере с помощью спутников GPS. Для анализа использовались данные двухчастотных фазовых измерений, полученные 4–6 мая 2013 г. на четырех высокоширотных станциях GPS: LOVJ (Мурманск), NRIL (Норильск), TIXI (Тикси), BILB (Билибино). На некоторых лучах «приемник-спутник», проходящих к северу от станций (в области широт 72–84° N), обнаружено резкое падение или возрастание ПЭС. Это означает, что на данных широтах в ионосфере существует ограниченная область с пониженной электронной концентрацией («провал ионизации»). Полученные результаты согласуются с данными численного моделирования.

In this work, we have studied spatial distribution of the total electron content (TEC) in the high-latitude ionosphere by GPS satellites. For the analysis, we have used data of two-frequency phase measurements obtained on May 4–6, 2013 at four high-latitude GPS stations, namely, LOVJ (Murmansk), NRIL (Norilsk), TIXI (Tiksi), BILB (Bilibino). We have detected a sharp decrease or increase of TEC on some «receiver-satellite» lines of sight passing northward the stations (in the latitude range 72–84° N). This means that a local region with low electron density («ionization trough») exists in the ionosphere at these latitudes. The obtained results are consistent with the data of numerical simulation.

Введение

Неоднородности ионосферы оказывают значительное влияние на распространение радиоволн. Для расчета параметров радиотрасс важен точный прогноз состояния ионосферы на пути прохождения радиосигналов. В связи с этим, возникает потребность в изучении, мониторинге, прогнозе пространственной структуры и динамики ионосферы. Большой интерес вызывает высокоширотная область ионосферы, которая отличается сильной изменчивостью и наличием большого числа неоднородностей электронной концентрации различных масштабов. К крупномасштабным неоднородностям относятся: главный ионосферный провал (ГИП), высокоширотные провалы, полярная полость, авроральные пики и «язык» ионизации [Тащилин, 2014]. Для исследования и мониторинга пространственного распределения полного электронного содержания в высокоширотной ионосфере можно использовать глобальную навигационную спутниковую систему GPS, с помощью которой решаются многие задачи, связанные с изучением поведения ионосферной плазмы.

Данные и методы исследования

В настоящей работе с помощью системы GPS проведено исследование пространственного распределения полного электронного содержания в высокоширотной ионосфере. Использовались данные за 4–6 мая 2013 г. (124–126 день года), полученные на высокоширотных GPS-станциях, входящих в международную сеть IGS: LOVJ (Мурманск), NRIL (Норильск), TIXI (Тикси), BILB (Билибино). Данные GPS-измерений получены на сервере IGS [http://sopac.ucsd.edu]. Для анализа был выбран период времени 04:00–10:00 UT, поэтому использовались данные только тех спутников, которые находились в зоне радиовидимости станций NRIL, LOVJ, TIXI, BILB в этот период времени.

Экспериментальные результаты сравнивались с данными численного моделирования простран-

ственного распределения ПЭС. Для этой цели использовалась, разработанная в ИСЗФ СО РАН теоретическая модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, учитывающая дрейф плазмы поперек геомагнитных силовых линий [Кринберг, Тащилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 1995, 2002]. Нестационарная численная диффузионная модель описывает распределения параметров плазмы в дрейфующих дипольных плазменных трубках произвольного размера на высотах больше 120 км. На основе представленной модели были рассчитаны глобальные распределения характеристик тепловой плазмы для 05:00 UT и 07:00 UT 5 мая 2013 г. Каждое глобальное распределение представлено набором из 576 дипольных силовых линий, распределенных по географической широте от 40 до 90° с шагом 2.5° и по долготе от 0 до 360° с шагом 10°. В качестве полного электронного содержания была принята величина N_T , равная электронному содержанию вдоль силовой линии, основание которой находится в одном из узлов сетки, в интервале высот от 120 до 1000 км.

Пространственно-временные вариации ПЭС по данным GPS

Анализ временных вариаций ПЭС в период 04:00–10:00 UT на станциях LOVJ, NRIL, TIXI, BILB показал, что для некоторых спутников 5 мая наблюдались резкие отклонения ПЭС от фонового уровня контрольных дней 4 и 6 мая. На станции NRIL зафиксированы резкие увеличения или уменьшения ПЭС в начале или конце периода видимости спутников GPS с номерами PRN04, PRN12, PRN25, PRN29. На рис. 1, а, б показано резкое увеличение уровня вариаций ПЭС в начале периода видимости спутника PRN04 и отклонение ПЭС от фонового уровня контрольных дней в течение всего движения у спутника PRN02. На станции LOVJ отклонение ПЭС от фонового уровня контрольных дней наблюдалось во время всего движения спутников

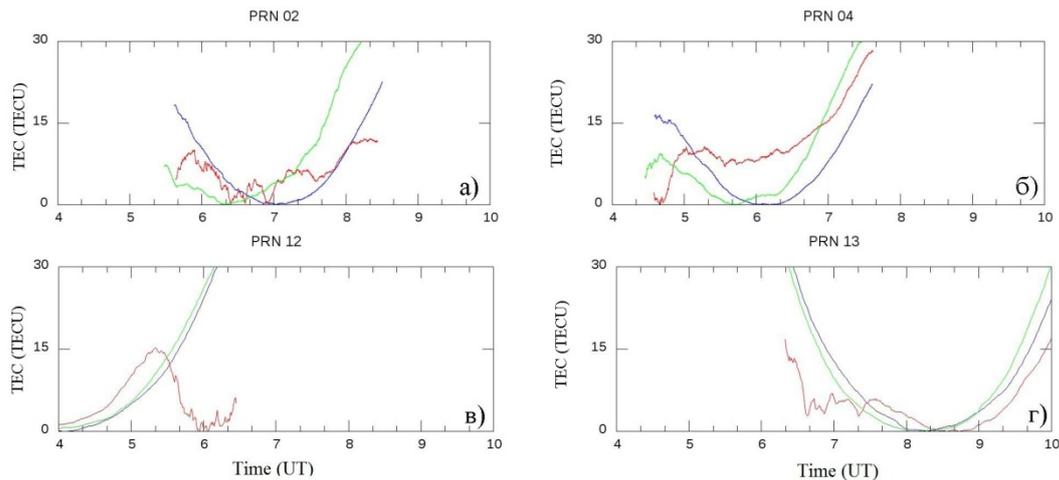


Рис. 1. Вариации ПЭС на станциях NRIL (спутники PRN02 и PRN04) (а, б) и TIXI (спутники PRN12 и PRN13) (в, г) 04.05.2013 (синяя линия), 05.05.2013 (красная линия), 06.05.2013 (зеленая линия).

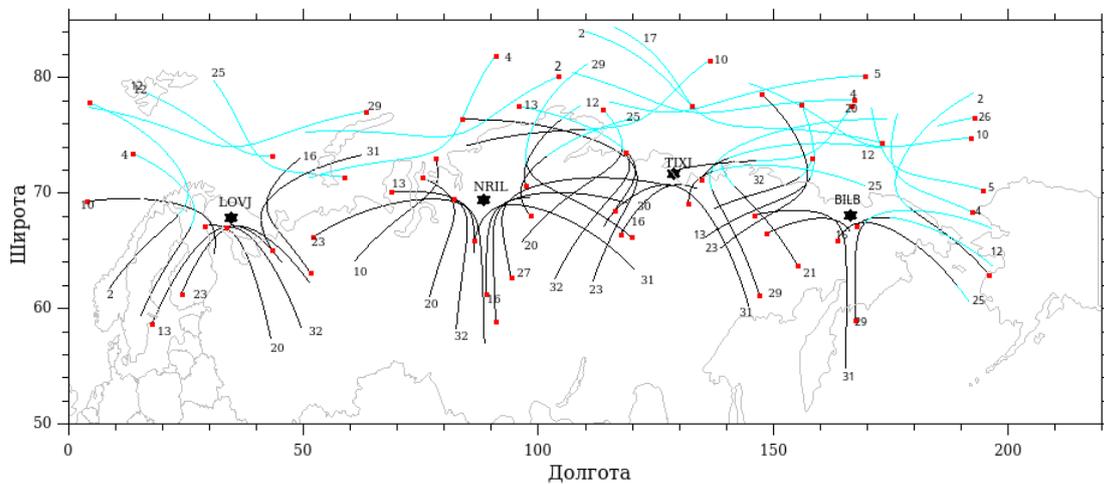


Рис. 2. Траектории движения ионосферных точек для спутников, наблюдавшихся 5 мая 2013 г. в период 04:00–10:00 UT на станциях LOVJ, NRIL, TIXI, BILB. Красными точками обозначено начало траекторий. Голубыми линиями отмечены те части траекторий, на которых зарегистрированы отклонения ПЭС от фонового уровня.

PRN02, PRN04, PRN12, PRN25. На станции TIXI падения ПЭС зарегистрированы при выходе из зоны радиовидимости спутников PRN12 (рис. 1, в), PRN17, PRN25, PRN21. Уменьшенные значения ПЭС наблюдались при входе в зону радиовидимости спутника PRN13 (рис. 1, г). Отклонение ПЭС от фонового уровня контрольных дней наблюдалось во время всего движения спутников PRN02, PRN04, PRN10. На станции BILB резкое падение ПЭС зафиксировано в конце радиовидимости спутников PRN12, PRN29, отклонение ПЭС от фонового уровня контрольных дней наблюдалось во время всего движения спутников PRN02, PRN04, PRN20, PRN23, PRN26.

Таким образом, на некоторых лучах «приемник–спутник», наблюдалось резкое отклонение (уменьшение или возрастание) вариаций ПЭС от уровня контрольных дней. Это означает, что 5 мая в ионосфере существовала область с пониженной электронной концентрацией («провал ионизации»). При входе луча «приемник–спутник» в эту область ПЭС уменьшалось, а при выходе из нее – возрастало.

Для того чтобы определить положение провала ионизации, построены траектории ионосферных

точек, которые отражают движение спутников, находившихся в зоне радиовидимости станций NRIL, LOVJ, TIXI, BILB в период 04:00–10:00 UT (рис. 2). Части траекторий, на которых наблюдались отклонения ПЭС, отмечены голубым. Видно, что ионосферный провал лежит в области широт 72–84° N и долгот 0–200° E.

Пространственное распределение ПЭС по данным моделирования

На рис. 3 приведены карты ПЭС (N_T), рассчитанные с помощью теоретической модели ионосферно-плазменного взаимодействия (раздел 2). На ночной стороне хорошо видны две области пониженных значений ПЭС (рис. 3, а): первая серповидная область с понижением значений N_T до $12 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в диапазоне долгот 225–355° E и широт 52–65° N, что соответствует ГИП; вторая область с понижением значений N_T до $18 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в диапазоне долгот 230–15° E и широт 65–78° N, что соответствует полярной полости (ПП). На дневной стороне видна узкая область пониженных значений N_T до $20\text{--}18 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ на широтах 78–85° N (долготы 40–200° E) – это высоко-

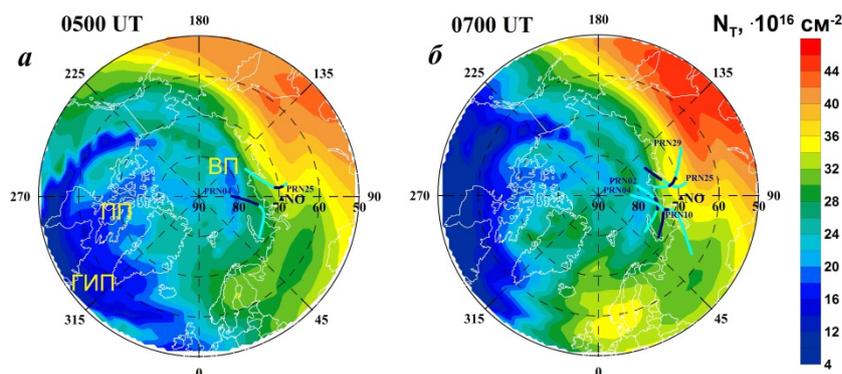


Рис. 3. Карты ПЭС (N_T) в географических координатах, рассчитанные по модели ионосферно-плазмозферного взаимодействия [Кринберг, Тащилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 1995, 2002] для 05:00 UT и 07:00 UT 05 мая 2013 г. Треугольник – положение GPS-станции NRIL (NO), синие линии – траектории ионосферных точек с 03:30 до 10:00 UT, темный участок траектории соответствует интервалам времени 04:30–05:30 UT (а) и 06:30–07:30 UT (б).

коширотный провал (ВП). Крупномасштабная структура высокоширотной ионосферы меняется в зависимости от UT (рис. 3, а, б): ГИП смещается по долготе, ПП становится меньше по размерам, а ВП становится уже и значения ПЭС в нем повышается до $22 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Как видно из рис. 3, а, спутник PRN04 начал наблюдаться на станции NRIL, находясь внутри ВП, и в период 04:40–05:00 UT луч «приемник–спутник» пересекал экваториальную стенку провала – все это нашло отражение в поведении ПЭС (рис. 1, б). Спутник PRN25, двигаясь с юга на север, около 06:25 UT пересек экваториальную стенку ВП, что выразилось в резком падении ПЭС, аналогичном показанному на рис. 1, в для спутника PRN13. Луч NRIL-PRN02 в период 06:30–07:30 UT двигался вдоль экваториальной стенки ВП. Вариации ПЭС (рис. 1, а) в это время показывают сильную изменчивость и уменьшение ПЭС на краях интервала, когда луч попадал в провал. Таким образом, численная модель подтверждает наличие ионосферного провала, зафиксированного по данным спутников GPS.

Заключение

Анализ данных, полученных на станциях NRIL, LOVJ, TIXI, BILB в период 04:00–10:00 UT 5 мая 2013 г., показал, что на некоторых лучах «приемник–спутник», проходящих к северу от станций, наблюдаются резкие падения или возрастания ПЭС. Это означает, что в ионосфере существует область с по-

ниженной электронной концентрацией («провал ионизации»). По траекториям ионосферных точек выявлено что ионосферный провал лежит в области широт $72\text{--}84^\circ \text{ N}$ и долгот $0\text{--}200^\circ \text{ E}$. Полученные экспериментальные результаты подтвердились данными численного моделирования.

Авторы выражают благодарность Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC, [http://sopac.ucsd.edu]) за данные глобальной сети приемников GPS. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00027).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Тащилин А.В. Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях. Диссертация д-ра физико-математических наук. Иркутск. 2014. 265 с.
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Tashchilin A.V., Romanova E.B. UT-control effects in the latitudinal structure of the ion composition of the topside ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57, N. 12. P. 1497–1502.
- Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // Proceeding of COSPAR Colloquia Series. 2002. V. 14. P. 315–325.
- http://sopac.ucsd.edu.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия