
**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
СОДЕРЖАНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ ПО ДАННЫМ GPS**
**SPATIAL DISTRIBUTION OF TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE ARCTIC
REGION OF RUSSIA FROM GPS DATA**

Н.П. Перевалова*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pereval@iszf.irk.ru***Е.Б. Романова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ebr@iszf.irk.ru***Д.Д. Каташевцева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет,
dasyadk@gmail.com***О.В. Тимофеева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, olga.timofeeva.1994@yandex.ru***N.P. Perevalova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pereval@iszf.irk.ru***E.B. Romanova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ebr@iszf.irk.ru***D.D. Katashevtseva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia
Irkutsk State University,
dasyadk@gmail.com***O.V. Timofeeva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, olga.timofeeva.1994@yandex.ru*

Аннотация. Представлены предварительные результаты исследования пространственного распределения полного электронного содержания (ПЭС) в Арктическом регионе России. Исследование выполнено по данным двухчастотных фазовых измерений, полученным в период 04:00–10:00 UT 4–6 мая 2013 г. на четырех высокоширотных станциях GPS: LOVJ (Мурманск), NRIL (Норильск), TIXI (Тикси), BILB (Билибино). На некоторых лучах приемник — спутник GPS, проходящих к северу от станций, обнаружены резкие падения или возрастания ПЭС, которые свидетельствуют о существовании в ионосфере области с пониженной электронной концентрацией (провал ионизации). На основе анализа перемещения лучей приемник — спутник GPS установлено, что ионосферный провал лежал в области широт 72–84° N и долгот 0–200° E. Полученные результаты согласуются с данными численного моделирования.

Ключевые слова: GPS, ионосфера, полное электронное содержание, высокоширотный провал, Арктический регион.

Abstract. Preliminary results of studying the spatial distribution of the total electron content (TEC) in the Arctic region of Russia are presented. The study is based on double frequency phase data obtained at four high-latitude GPS stations (LOVJ, Murmansk; NRIL, Norilsk; TIXI, Tiksi; BILB, Bilibino) on May 4–6, 2013 at 04:00–10:00 UT. On some receiver — GPS satellite rays northward of the stations, we have detected sharp TEC decreases or increases which argue for existence of a low electron density region (ionization trough) in the ionosphere. As found from the analysis of displacement of receiver– satellite rays, the ionization trough was located at latitudes of 72–84° N and longitudes of 0–200° E. The obtained results are consistent with numerical simulation data.

Key words: GPS, ionosphere, total electron content, high-latitude trough, Arctic region.

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 значительного числа неоднородностей электронной концентрации различных масшта-

бов. Крупной неоднородностью в субавроральных широтах является главный ионосферный провал (ГИП). Эта характерная структурная особенность субавроральной ионосферы представляет собой вытянутую вдоль геомагнитной широты (в области примерно 50–70° N) впадину в глобальном распределении электронной концентрации [Тащилин, 2014]. В строении провала выделяют относительно пологую экваториальную стенку, дно (основание) провала и крутую полярную стенку. Еще одной особенностью приполярной ионосферы являются высокоширотные провалы (ВП) в электронной концентрации, которые могут наблюдаться как в дневное, так и

в ночное время на широтах 60–75° N [Гальперин и др., 1990; Тащилин, 2014]. Областью локального уменьшения электронной концентрации является полярная полость (ПП), или полярная дыра. Эта область расположена на широтах 70–80° на ночной стороне. Она наблюдается во все сезоны как в Северном, так и в Южном полушарии. Величина электронной концентрации в ПП зависит от времени суток, сезона, уровня солнечной и геомагнитной активности.

Для исследования и мониторинга пространственного распределения полного электронного содержания (ПЭС) в высокоширотной ионосфере можно использовать глобальную навигационную спутниковую систему GPS, с помощью которой решаются многие задачи, связанные с изучением поведения ионосферной плазмы. В первых работах по зондированию арктической ионосферы с помощью сигналов GPS исследовался суточный ход ПЭС, а также связь поведения ПЭС с вариациями межпланетного магнитного поля и конвективными процессами [Klobuchar et al., 1985; Crain et al., 1993; Zarragoa, Sardon, 1996]. Много публикаций было посвящено изучению по данным GPS колебаний ПЭС, связанных с крупномасштабными ионосферными неоднородностями, которые возникают в авроральной зоне во время геомагнитных бурь [Jakowski et al., 2002, 2005; Афраймович, Перевалова, 2006; Shagimuratov et al., 2012; Ding et al., 2007; Perevalova et al., 2008]. В последние годы большое внимание уделяется исследованию мерцаний сигналов GPS, вызываемых мелкомасштабными ионосферными неоднородностями [Prikryl et al., 2010; Jiao et al., 2013; Spogli et al., 2013] и построению карт GPS ПЭС [Liu et al., 2010, Jakowski et al., 2012; Андреева и др., 2013]. В настоящей работе с помощью данных спутников GPS проведено изучение пространственного распределения ПЭС в Арктическом регионе РФ.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Полное электронное содержание представляет собой интеграл электронной концентрации вдоль некоторого направления:

$$I_0 = \int N_e(r) dr,$$

где I_0 — полное электронное содержание, N_e — электронная концентрация. При распространении в ионосфере радиосигналы испытывают задержку, величина которой пропорциональна ПЭС. Это обеспечивает возможность использовать радионавигационные сигналы спутниковой системы GPS для изучения свойств ионосферной плазмы. В практике ионосферных исследований ПЭС чаще всего определяется на основе двухчастотных фазовых измерений, выполненных GPS-приемником. При этом получают наклонное ПЭС вдоль луча приемник — спутник GPS, которое определено с точностью до константы, носящей название «неоднозначность фазовых измерений». Устранение этой неоднозначности требует применения специальных методик (комбинирование различных видов измерений,

фильтры Калмана и т. п.). Однако при изучении ионосферных возмущений можно использовать вариации ПЭС $I(t)$, рассчитанные без устранения неоднозначности. Фазовые измерения проводятся с высокой точностью (до сотых долей длины несущей радиоволны), что позволяет выделять возмущения ПЭС малой амплитуды и изучать неоднородности электронной концентрации в большом диапазоне периодов. Стандартные методы и формулы для расчета вариаций ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям приемника GPS приведены в [Афраймович, Перевалова, 2006; Куницын и др., 2007]. Для ПЭС введена специальная единица измерения $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Важную роль при измерениях ПЭС играет понятие ионосферной точки. Поскольку величина ПЭС является интегралом, она не может быть сопоставлена с конкретной точкой пространства, как электронная концентрация. Полагают, что основной вклад в интеграл дает область ионосферы, расположенная в окрестности главного максимума ионизации [Куницын и др., 2007; Ding et al., 2007]. Поэтому принято сопоставлять ПЭС с ионосферной точкой — точкой пересечения луча приемник — спутник GPS со сферой, расположенной на высоте главного максимума ионизации.

В настоящей работе исследовались пространственные и временные распределения вариаций ПЭС 4–6 мая 2013 г. по данным, полученным на высокоширотных GPS-станциях, входящих в международную геодинамическую сеть IGS: LOVJ (Мурманск), NRIL (Норильск), TIXI (Тикси), BILB (Билибино). Данные GPS-измерений получены с сервера IGS [http://sopac.ucsd.edu]. Использовались данные только тех спутников, которые находились в зоне радиовидимости ст. NRIL, LOVJ, TIXI, BILB в период времени 04:00–10:00 UT. Выбор дат связан с регистрацией в Норильске 5 мая 2013 г. интересных магнитных пульсаций. В дальнейшем для указанных дней предполагается провести совместный анализ флуктуаций геомагнитного поля и GPS ПЭС.

Численное моделирование применялось с целью выявления структурных особенностей в распределении ПЭС в высоких широтах. В работе 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]. Эта нестационарная численная диффузионная модель описывает распределение параметров плазмы в дрейфующих дипольных плазменных трубках произвольного размера на высотах больше 120 км. Модель учитывает ионообразование и потери ионов в химических реакциях, диффузию плазмы вдоль геомагнитных силовых линий, приводящую к заполнению плазмосферы, взаимодействие с горизонтальным термосферным ветром. На высоких широтах учитывается влияние магнитосферных источников, таких как поперечный дрейф плазмы под действием электрического поля магнитосферной конвекции и ударная ионизация высыпавшимися электронами.

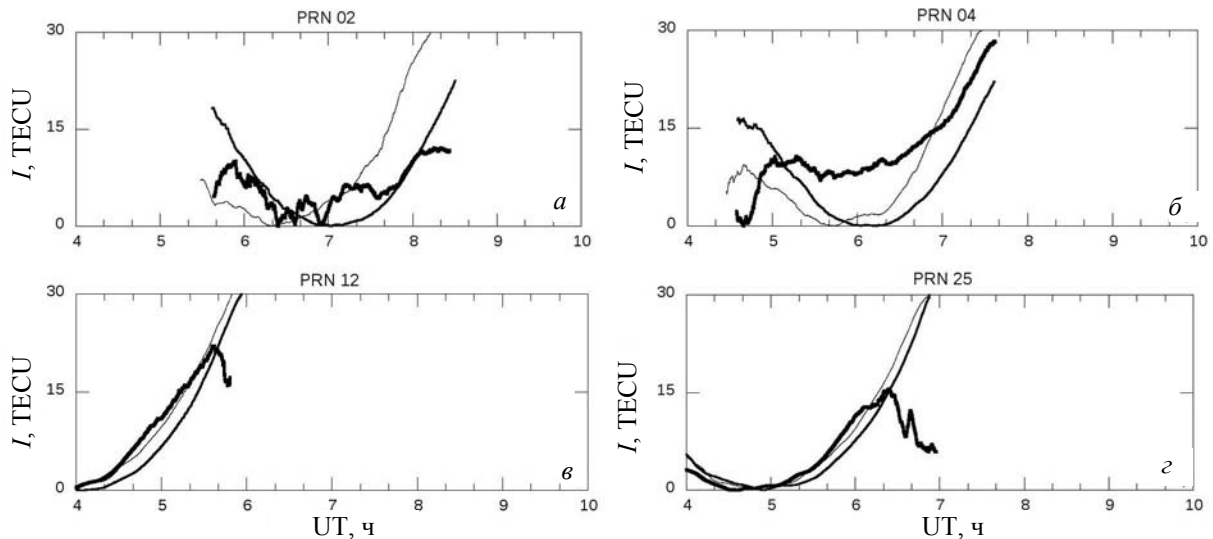


Рис. 1. Вариации ПЭС на ст. NRIL для GPS-спутников PRN02 (а), PRN04 (б), PRN12 (в), PRN25 (г), 04.05.2013 г. (черная линия), 05.05.2013 г. (толстая черная линия), 06.05.2013 г. (серая линия)

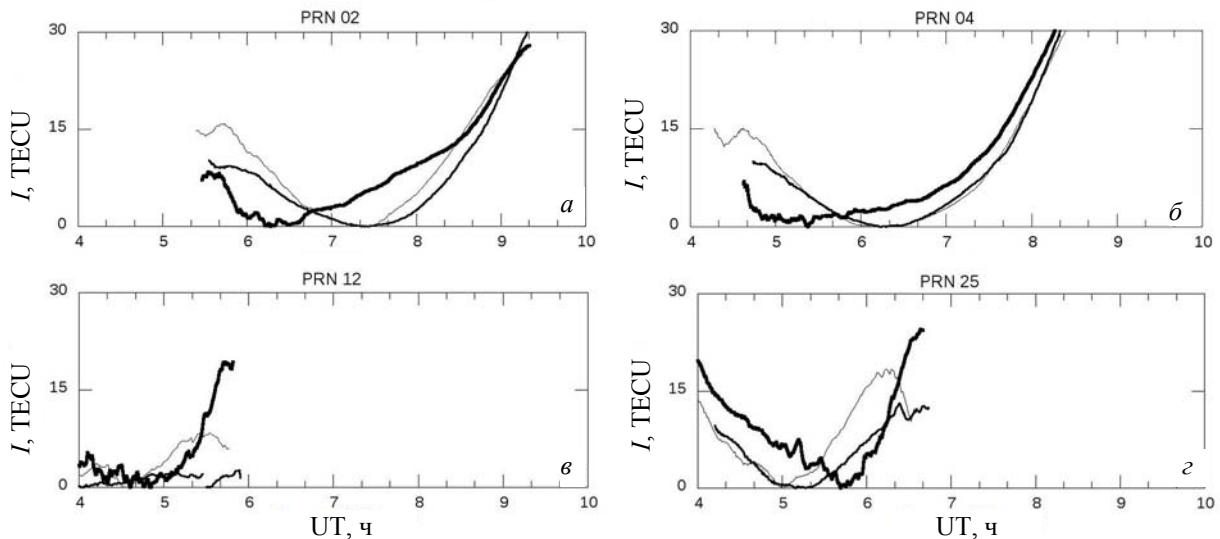


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для ст. LOVJ

На основе представленной модели были рассчитаны глобальные распределения характеристик тепловой плазмы для 05:00 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 ПЭС была принята величина N_T , равная ПЭС вдоль силовой линии, основание которой находится в узле сетки, в интервале высот от 120 до 1000 км. Значения N_T не могут напрямую сравниваться с экспериментальными величинами $I(t)$ в силу ряда причин ($I(t)$ — не абсолютное значение ПЭС; N_T и $I(t)$ рассчитываются вдоль разных лучей). Однако N_T показывает пространственное распределение электронной концентрации в высокоширотной ионосфере, значительные градиенты которого могут найти отражение в поведении вариаций ПЭС $I(t)$.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПЭС ПО ДАННЫМ GPS

Анализ временных вариаций ПЭС в период 04:00–10:00 UT на ст. LOVJ, NRIL, TIXI, BILB показал, что для некоторых спутников 5 мая наблюдались резкие отклонения ПЭС от фонового уровня в контрольные дни 4 и 6 мая. На ст. NRIL зафиксированы резкие увеличения или уменьшения ПЭС в начале или конце периода видимости спутников GPS PRN04, PRN12, PRN25, PRN29. На рис. 1, б видно резкое увеличение уровня вариаций ПЭС в начале периода видимости спутника PRN04 и отклонение ПЭС от фонового уровня в контрольные дни в течение всего движения спутника PRN02 (рис. 1, а). Резкое падение ПЭС зафиксировано в конце периода радиовидимости спутников PRN12 и PRN25 (рис. 1, в–г).

На ст. LOVJ отклонение ПЭС от фонового уровня в контрольные дни зафиксировано во время всего движе-

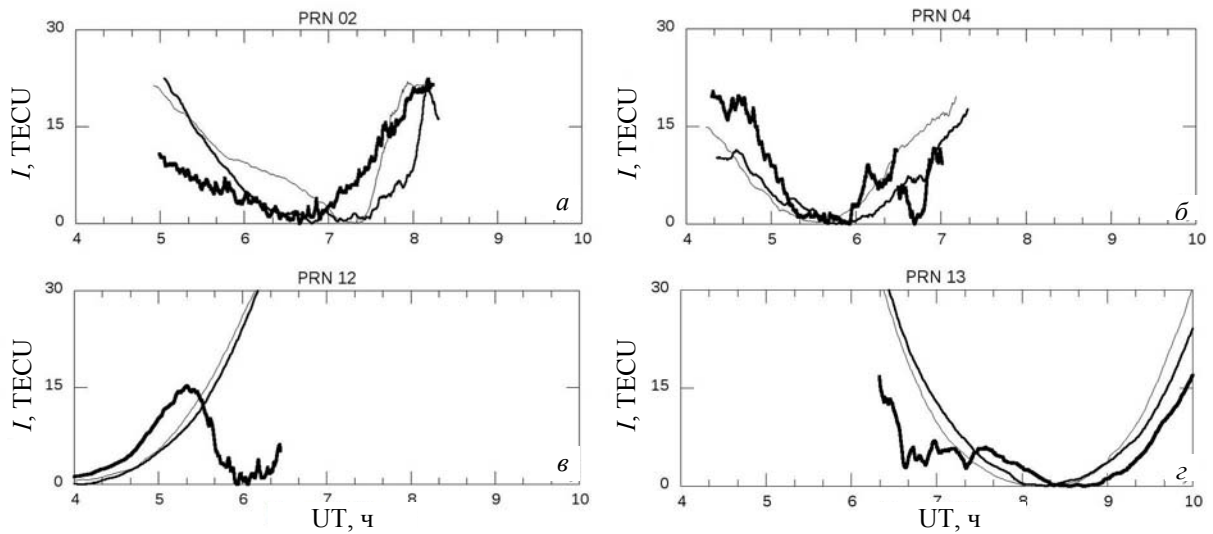


Рис. 3. Вариации ПЭС на ст. TIXI для GPS-спутников PRN02 (а), PRN04 (б), PRN12 (в), PRN13 (г), 04.05.2013 г. (черная линия), 05.05.2013 г. (толстая черная линия), 06.05.2013 г. (серая линия)

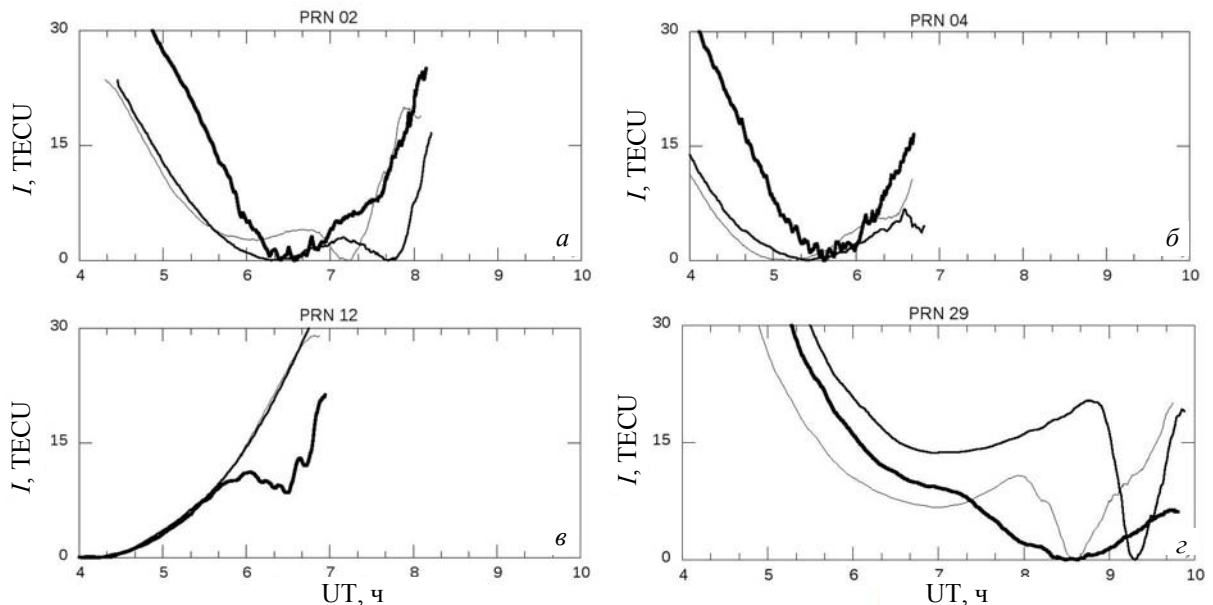


Рис. 4. Вариации ПЭС на ст. BILB для GPS-спутников PRN02 (а), PRN04 (б), PRN12 (в), PRN29 (г), 04.05.2013 г. (черная линия), 05.05.2013 г. (толстая черная линия), 06.05.2013 г. (серая линия)

ния спутников PRN02, PRN04, PRN12 (рис. 2, а–в). Повышенные значения ПЭС наблюдались в первой половине периода радиовидимости спутника PRN25 (рис. 2, г).

На ст. TIXI резкое падение ПЭС зарегистрировано при выходе из зоны радиовидимости спутника PRN12 (рис. 3, в), а также спутников PRN17, PRN25, PRN21. Пониженные значения ПЭС наблюдались при входе в зону радиовидимости спутника PRN13 (рис. 3, г). Отклонение ПЭС от фонового уровня в контрольные дни наблюдалось во время всего движения спутников PRN10, PRN02 (рис. 3, а), PRN04 (рис. 3, б).

На ст. BILB резкое падение ПЭС наблюдалось в конце периода радиовидимости спутников PRN12 (рис. 4, в) и PRN29 (рис. 4, г). Отклонение ПЭС от

фоновому уровню в контрольные дни наблюдалось во время всего движения спутников PRN02 (рис. 4, а), PRN04 (рис. 4, б), а также спутников PRN20, PRN23, PRN26.

Таким образом, на некоторых лучах приемник–спутник зарегистрированы резкие отклонения (уменьшение или возрастание) вариаций ПЭС от фонового уровня в контрольные дни. Такое поведение означает, что 5 мая 2013 г. в ионосфере существовала область пониженной электронной концентрации (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, находив-

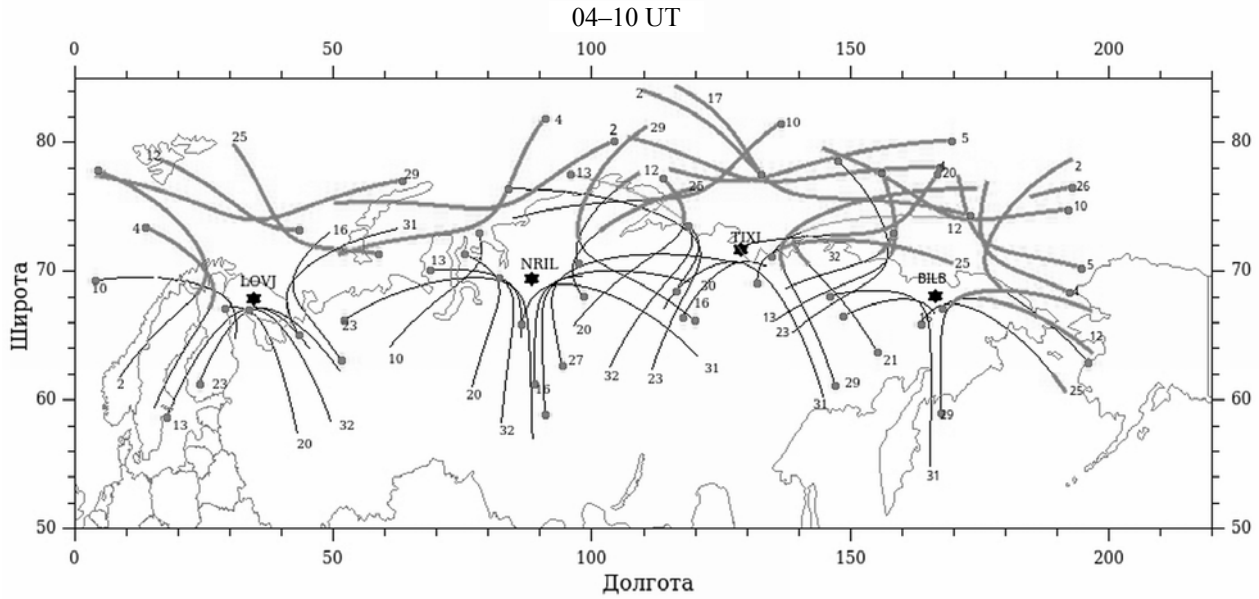


Рис. 5. Траектории движения ионосферных точек для спутников, наблюдавших 5 мая 2013 г. в период 04:00–10:00 UT на ст. LOVJ, NRIL, TIXI, BILB. Крупными серыми точками обозначены начала траекторий. Толстыми темно-серыми линиями отмечены те части траекторий, на которых зарегистрированы отклонения ПЭС от фонового уровня в контрольные дни

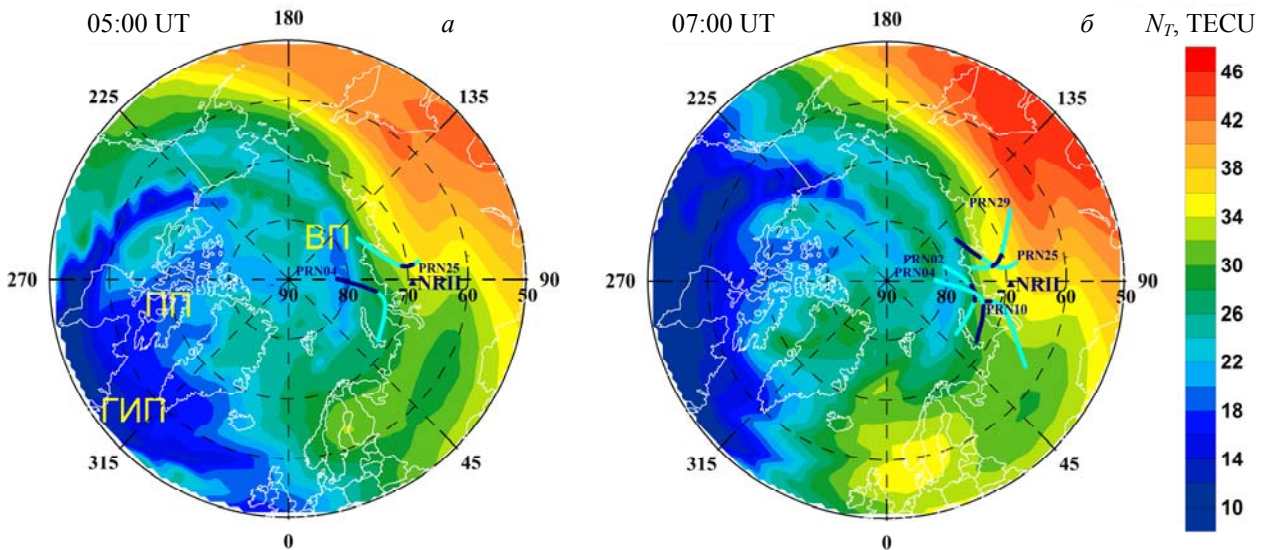


Рис. 6. Карты ПЭС (N_T) в географических координатах, рассчитанные по модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия [Кринберг, Тащилин, 1984; Tashchilin, Romanova, 1995, 2002] для 05:00 (а) и 07:00 UT (б) 05 мая 2013 г. Треугольник — положение GPS-станции NRIL, толстые линии — траектории ионосферных точек с 03:30 до 10:00 UT, темные участки траекторий соответствуют интервалам времени 04:30–05:30 (а) и 06:30–07:30 UT (б)

шихся в зоне радиовидимости ст. NRIL, LOVJ, TIXI, BILB в период 04:00–10:00 UT (рис. 5). Части траекторий, на которых наблюдались отклонения ПЭС, отмечены темно-серым цветом. Видно, что ионосферный провал располагался в области широт 72–84° N и долгот 0–200° E.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЭС ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 6 приведены карты ПЭС (N_T), рассчитанные с помощью теоретической модели ионосферно-плазмосферного взаимодействия (см. раздел «Данные и методы анализа»). На ночной стороне

хорошо видны две области пониженных значений ПЭС (рис. 6, а): первая — серповидная область с понижением значений N_T до 12 TECU в диапазоне долгот 225–355° E и широт 52–65° N — соответствует ГИП; вторая — область с понижением значений N_T до 18 TECU в диапазоне долгот 230–15° E и широт 65–78° N — соответствует полярной полости. На дневной стороне видна узкая область пониженных значений N_T до 18–20 TECU на широтах 78–85° N (долготы 40–200° E) — высокоширотный провал. Крупномасштабная структура высокоширотной ионосферы меняется в зависимости от UT (рис. 6, а, б): ГИП смещается по долготе, ПП становится меньше по размерам, а ВП сужается и значения ПЭС в нем повышаются до 22 TECU.

Высокоширотные провалы — менее изученные структуры, чем ГИП и ПП. Они были обнаружены как по спутниковым данным [Muldrew, 1965], так и по наземным наблюдениям [Dudeny et al., 1983]. ВП появляются как в спокойные, так и в геомагнитно-возмущенные периоды и существуют в течение нескольких часов. В период 04:00–10:00 UT 5 мая 2013 г. индекс геомагнитной активности $K_p \leq 2$, что соответствует спокойным геомагнитным условиям. Обычно рассматривают несколько процессов, которые формируют ВП, связанных в основном с эффектами магнитосферной конвекции. ВП часто формируется вблизи зоны разворота конвекции [Heppner, Maynard, 1987]. По данным радаров SuperDARN [www.vt.superdarn.org], в 05:00 UT 5 мая 2013 г. разворот конвекции находился в области широт $75\text{--}80^\circ$ N и долгот $45\text{--}135^\circ$ E. В расчетах электрическое поле магнитосферной конвекции задавалось по эмпирической модели [Weimer, 1995] и разворот конвекции находился в области широт $78\text{--}82^\circ$ N и долгот $45\text{--}190^\circ$ E, что согласуется с данными радаров SuperDARN.

Как видно из рис. 6, 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 (рис. 1, з). Луч NRIL–PRN02 в 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, численное моделирование показывает, что может сформироваться ионосферный провал, аналогичный зафиксированному по данным спутников GPS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным высокоширотных станций GPS NRIL, LOVI, TIXI, BILB проведено исследование пространственного распределения ПЭС в Арктическом регионе России в период 04:00–10:00 UT 4–6 мая 2013 г. В результате анализа полученных данных обнаружено, что 5 мая 2013 г. на некоторых лучах приемник — спутник GPS, проходивших к северу от станций, наблюдались резкие отклонения ПЭС от характерного хода в контрольные дни 4 и 6 мая. Это означает, что в ионосфере существовала ограниченная область с пониженной электронной концентрацией (провал ионизации). Расположение провала установлено с помощью анализа перемещения лучей приемник — спутник GPS: провал лежал в области широт $72\text{--}84^\circ$ N и долгот $0\text{--}200^\circ$ E. Проведенное численное моделирование глобального распределения характеристик тепловой плазмы для 05:00 и 07:00 UT 5 мая 2013 г. показало, что на высоких широтах на дневной стороне в том же диапазоне широт и долгот может сформироваться область пониженных значений ПЭС, которую можно идентифицировать как высокоширотный провал.

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

- Андреева Е.С., Калашникова С.А., Куницын В.Е. и др. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 103–111.
- Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М. и др. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
- Тащилин А.В. Формирование крупномасштабной структуры ионосферы в спокойных и возмущенных условиях: дис. д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29. Иркутск, 2014. 265 с.
- Crain D.J., Sojka J.J., Schunk R.W., et al. A first-principle derivation of the high-latitude total electron content distribution // Radio Sci. 1993. V. 28, N 1. P. 49–61.
- Ding F., Wan W., Ning B., et al. Large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during the magnetic storm of October 29–30, 2003 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A06309.
- Dudeny J.R., Rodger A.S., Jarvis M.J. Radio studies of the main F region trough in Antarctica // Radio Sci. 1983. V. 18, N 6. P. 927–936.
- Heppner J.P., Maynard N.C. Empirical high-latitude electric field models // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4467–4489.
- Jakowski N., Beniguel Y., De Franceschi G., et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques // J. Space Weather Space Clim. 2012. V. 2. A22.
- Jakowski N., Stankov S.M., Klaehn D. Operational space weather service for GNSS precise positioning // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 3071–3079.
- Jakowski N., Wehrenpfennig A., Heise S. Total electron content behavior at high latitudes during geomagnetic storms // Proceedings of XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science. Maastricht, Netherlands, August 17–24 2002 (URSI GA 2002), 2002. paper N 2176. URL: <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p2176.pdf>. (accessed November 27, 2015).
- Jiao Y., Morton Y.T., Taylor S., et al. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals // Radio Sci. 2013. V. 48, N 6. P. 698–708.
- Klobuchar J.A., Bishop G.J., Doherty P.H. Total Electron Content and L-Band Amplitude and Phase Scintillation Measurements in the Polar Cap Ionosphere // AGARD Electromagnetic Wave Panel Symposium, AGARD Conference Proceedings. 1985. N 382. Paper 2-2.
- Liu J., Chen R., Kuusniemi H., et al. A preliminary study on mapping the regional ionospheric TEC using a spherical Cap Harmonic Model in high latitudes and the Arctic Region // Journal of Global Positioning Systems. 2010. V. 9, N 1. P. 22–32.

Muldrew D.B. F-layer ionization trough deduced from Alouette data // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70, N 11. P. 2635–2650.

Perevalova N.P., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., et al. Parameters of large scale TEC disturbances during strong magnetic storm on October 29, 2003 // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A00A13.

Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., et al. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 1307–1316.

Shagimuratov I.I., Krankowski A., Ephishov I., et al. High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 521–529.

Spogli L., Alfonsi L., Cilliers P.J., et al. GPS scintillations and total electron content climatology in the southern low, middle and high latitude regions // *Ann. Geophys.* 2013. V. 56, N 2. R0220.

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere // *Proceeding of COSPAR Colloquia Series.* 2002. V. 14. P. 315–325.

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.

Weimer D.R. Models of high-latitude electric potentials derived with a least error fit of spherical harmonic coefficients // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 19595–19607.

Zarraoa N., Sardon E. Test of GPS for permanent ionospheric TEC monitoring at high latitudes // *Ann. Geophys.* 1996. V. 14, N 1. P. 11–19.

URL: <http://sopac.ucsd.edu> (accessed November 27, 2015).

URL: www.vt.superdam.org (accessed November 27, 2015).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, SC RRS SB RAMS, 2006, 480 p. (in Russian).

Andreeva E.S., Kalashnikova S.A., Kunicyn V.E., Nesterov I.A. Study high-latitude ionosphere by UV spectrometry, global ionospheric maps of GIM and high-orbit radio tomography. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Probing Earth from Space]. 2013, vol. 10, no. 1. pp. 103–111. (in Russian).

Crain D.J., Sojka J.J., Schunk R.W., Doherty P.H., Klobuchar J.A. A first-principle derivation of the high-latitude total electron content distribution. *Radio Science.* 1993, vol. 28, no. 1, pp. 49–61.

Ding F., Wan W., Ning B., Wang M. Large scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during the magnetic storm of October 29–30, 2003. *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 112, A06309.

Dudeny J.R., Rodger A.S., Jarvis M.J. Radio studies of the main F region trough in Antarctica. *Radio Sci.* 1983, vol. 18, no. 6, pp. 927–936.

Galperin Ju.I., Sivtceva L.D., Filippov V.M., Khalipov V.L. *Subavoral'naya verkhnyaya ionosfera* [Subauroral Upper Ionosphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 192 p. (in Russian).

Heppner J.P., Maynard N.C. Empirical high-latitude electric field models. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, no. A5, pp. 4467–4489.

Jakowski N., Beniguel Y., De Franceschi G., Pajares M.H., Jacobsen K.S., Stanislawski I., Tomasik L., Warnant R., Wautelet G. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques. *J. Space Weather Space Clim.* 2012, vol. 2, A22.

Jakowski N., Stankov S.M., Klaehn D. Operational space weather service for GNSS precise positioning. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, pp. 3071–3079.

Jakowski N., Wehrenpfennig A., Heise S. Total electron content behavior at high latitudes during geomagnetic storms.

Proceedings of XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Maastricht, Netherlands, August 17–24 2002 (URSI GA 2002). 2002, paper no. 2176, URL: <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p2176.pdf>. (accessed November 27, 2015).

Jiao Y., Morton Y.T., Taylor S., Pelgrum W. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals. *Radio Sci.* 2013, vol. 48, no. 6, pp. 698–708.

Klobuchar J.A., Bishop G.J., Doherty P.H. Total Electron Content and L-Band Amplitude and Phase Scintillation Measurements in the Polar Cap Ionosphere. *AGARD Electromagnetic Wave Panel Symposium, AGARD Conference Proceedings.* 1985, no. 382, paper 2-2.

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. *Ionosfera i plazmosfera* [Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 189 p. (in Russian).

Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. *Radio-tomografiya ionosfery* [Ionospheric Radiotomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 336 p. (in Russian).

Liu J., Chen R., Kuusniemi H., Wang Z., Zhang H., Yang J. A preliminary study on mapping the regional ionospheric TEC using a Spherical Cap Harmonic Model in high latitudes and the Arctic region. *Journal of Global Positioning Systems.* 2010, vol. 9, no. 1, pp. 22–32.

Muldrew D.B. F-layer ionization trough deduced from Alouette data. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, no. 11, pp. 2635–2650.

Perevalova N.P., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Zhivetiev I.V. Parameters of large scale TEC disturbances during strong magnetic storm on October 29, 2003. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00A13.

Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Pokhotelov D., MacDougall J.W., Donovan E., Spanswick E., St. Maurice J.P. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum. *Ann. Geophys.* 2010, vol. 28, pp. 1307–1316.

Shagimuratov I.I., Krankowski A., Ephishov I., Cherniak Yu., Wielgosz P., Zakharenkova I. High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms. *Earth Planets Space.* 2012, vol. 64, pp. 521–529.

Spogli L., Alfonsi L., Cilliers P.J., Correia E., Franceschi G., Mitchell C.N., Romano V., Kinrade J., Cabrera M. A. GPS scintillations and total electron content climatology in the southern low, middle and high latitude regions. *Ann. Geophys.* 2013, vol. 56, no. 2, R0220.

Tashchilin A.V. *Formirovanie krupnomasshtabnoi struktury ionosfery v spokoinnykh i vozmushchennykh usloviyakh. Dokt. Diss.* [The Formation of Large-Scale Structure of the Ionosphere in the Quiet and Disturbed Conditions]. Irkutsk, 2014, 265 p. (in Russian).

Tashchilin A.V., Romanova E.B. Numerical modeling the high-latitude ionosphere. *Proceeding of COSPAR Colloquia Series.* 2002, vol. 14, pp. 315–325.

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, vol. 57, no. 12. pp. 1497–1502.

Weimer D.R. Models of high-latitude electric potentials derived with a least error fit of spherical harmonic coefficients. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, pp. 19595–19607.

Zarraoa N., Sardon E. Test of GPS for permanent ionospheric TEC monitoring at high latitudes. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, no. 1, pp. 11–19.

URL: <http://sopac.ucsd.edu> (accessed November 27, 2015).

URL: www.vt.superdam.org (accessed November 27, 2015).

Статья подготовлена по материалам Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» Международной Байкальской молодежной школы по фундаментальной физике