

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

УДК 537.874, 550.388.2

А. А. СОПИН, Е. М. ЗАНИМОНСКИЙ,
В. Н. ЛИСАЧЕНКО, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: sopin@rian.kharkov.ua

ОСОБЕННОСТИ ФОНОВЫХ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ

Представлены результаты исследований вариаций полного электронного содержания ионосферы над Антарктическим полуостровом по данным локальной сети перманентных станций ГНСС в течение 450 суток в 2009–2010 гг. Проанализированы суточные зависимости скоростей и направлений движения ионосферных неоднородностей для различных сезонов. В дневное время неоднородности распространяются преимущественно в северо-восточном направлении. В вечернее время осенью и зимой наиболее характерным является северо-западное направление движения, весной и летом – юго-западное. Скорости перемещения днем составляют примерно $300 \div 500$ м/с. В ночное время ионосферные неоднородности распространяются в более широком диапазоне скоростей и направлений.

Ключевые слова: ионосферные неоднородности, полное электронное содержание, ГНСС

1. Введение

Исследования ионосферы при различной солнечной и геомагнитной активности – это актуальная задача физики атмосферы Земли. Они важны также для развития методов диагностики и прогнозирования состояния околоземного космического пространства, что является существенной частью исследований космической погоды. Это связано с тем, что ионосфера представляет собой чувствительную среду, реагирующую на процессы в атмосфере и геокосмосе, не регистрируемые напрямую современными техническими средствами. Прямые высотные измерения параметров нейтральной компоненты верхней атмосферы сложны, требуют специальных методов и дорогостоящих инструментов. В то же время, используя измерения характеристик ее ионизированной компоненты различными радиофизическими методами, можно исследовать динамику нейтральной атмосферы.

Параметры ионосферы зависят, в первую очередь, от активности Солнца, его электромагнит-

ного и корпускулярного излучения. Однако немаловажную роль играют и другие возмущающие факторы, связанные, например, с метеорологическими явлениями и термосферными ветрами.

Антарктический полуостров является удобным местом для проведения исследований тропосферно-ионосферного взаимодействия. Это связано с высокой циклонической активностью региона и значительным разносом географических и геомагнитных координат.

Отличительной чертой ионосферы над Антарктическим полуостровом является аномальный суточный ход электронной концентрации в летнее время в южном полушарии. С ноября по февраль минимум концентрации электронов наблюдается около местного полудня, а максимум – около полуночи. Этот эффект был обнаружен при вертикальном зондировании ионосферы во время Международного геофизического года в 1957–1958 гг. Позднее он был подтвержден по данным спутниковых наблюдений и известен как “аномалия моря Уэдделла” (Weddell Sea Anomaly, WSA). Результаты исследований этого явления и библиография приведены в работах [1, 2]. Существование аномалии объясняется [2] определяющим

влиянием термосферных ветров на электронную концентрацию F-области в этом регионе.

Исследуя вариации электронного содержания ионосферы можно решать задачи моделирования механизмов воздействия на ионосферу “сверху” и “снизу” соответственно солнечного и тропосферного происхождения. Успешное решение проблемы взаимосвязи термосферных ветров [1, 2] с вариациями электронной концентрации позволило бы создать средство для мониторинга ветров по наблюдениям параметров ионосферы с использованием современных спутниковых систем.

Настоящая работа посвящена исследованию ионосферных неоднородностей (ИН), развитию представлений об их природе и динамике. Подобные исследования проводятся в глобальном масштабе [3–6], но пока явно недостаточно информации о динамике высокоширотной ионосферы, особенно в южном полушарии.

В 2009 г. в рамках международных проектов “Larsen Ice Shelf System Antarctica” (LARISSA, <<http://www.hamilton.edu/news/exp/LARISSA>>) и “The Polar Earth Observing Network” (POLENET, <<http://www.polenet.org>>) были установлены несколько новых permanentных станций ГНСС в регионе Антарктического полуострова: на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский” (код приемника VNAD), на острове Гюго (HUGO) и в Duthiers Point (DUPT). Использование данных, полученных на этих станциях, а также на станции “Palmer” (PALM), дает возможность организовать исследования характеристик ИН с пространственными масштабами более ста километров, и временными – от десятков минут до единиц часов.

Цель работы состояла в изучении пространственной структуры и временной динамики изменений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы над Антарктическим полуостровом. В рамках работы отработывалась методика определения характеристик ИН и анализировались сезонно-суточные особенности их изменений.

2. Методика обработки данных

Для решения поставленной задачи в настоящей работе были использованы данные, полученные на нескольких пространственно разнесенных станциях, и данные глобальных ионосферных карт, доступные на веб-страницах службы IGS (The International GNSS Service). На рис. 1 показан фрагмент

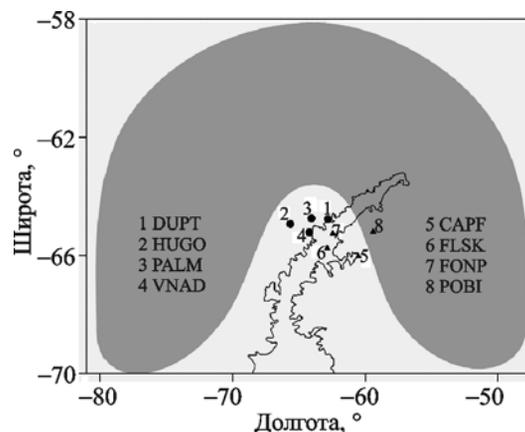


Рис. 1. Фрагмент карты Антарктического полуострова с расположением permanentных станций; 1–4 – станции, данные которых использовались в настоящей работе; 5–8 permanentные станции, установленные в 2010 году. Серой заливкой обозначена зона, над которой получены ионосферные данные

мент карты Антарктического полуострова с расположением permanentных станций ГНСС и отмечена зона, над которой были определены параметры ионосферы. Расстояния между станциями порядка 50 км.

Первичные данные обрабатывались для выделения вариаций ПЭС (δ ПЭС) по известной методике [3, 4, 7] с доработками авторов [8, 9]. Алгоритм обработки включал несколько этапов.

Вначале получались временные ряды наклонного ПЭС ионосферы вдоль луча “спутник – приемник” и пересчитывались к вертикальному направлению.

Затем из временных рядов ПЭС для каждого пролета навигационного спутника над станцией удалялся медленный тренд, обусловленный движением луча зрения в неоднородной нестационарной ионосфере. Тренд аппроксимировался полиномом десятой степени.

На следующем этапе с использованием триангуляционной методики, описанной в работах [3, 7], проводился расчет скоростей и направлений движения ИН. Полученные синхронные вариации ПЭС для четырех пространственно разнесенных станций в одном пролете спутника подвергались кросс-корреляционному анализу. Для каждой пары станций и каждого пролета рассчитывались взаимные корреляционные функции. По положению максимума взаимной корреляционной функции определялся временной сдвиг между вариациями ПЭС. Полученные временные сдвиги были использованы

ны для определения направлений (азимута) α и скоростей перемещения V_h ИН по формулам [7]:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{u_y}{u_x}, \quad V_h = \frac{u_x u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}},$$

$$u_x = \frac{X_{12}Y_{13} - X_{13}Y_{12}}{Y_{13}\tau_{21} - Y_{12}\tau_{31}}, \quad u_y = \frac{X_{12}Y_{13} - X_{13}Y_{12}}{X_{12}\tau_{31} - X_{13}\tau_{21}},$$

где (X_{12}, Y_{12}) , (X_{13}, Y_{13}) , – координаты векторов, соединяющих станции ГНСС, и τ_{21} , τ_{31} – соответствующие временные сдвиги между вариациями ПЭС.

Наряду с оценками скорости и направления движения неоднородностей для каждого пролета спутника рассчитывались среднеквадратическое отклонение (СКО) вариаций ПЭС, которые использовались в качестве меры возмущенности ионосферы в пространственной зоне, схематически показанной на рис. 1. Все полученные оценки по времени отнесены к моменту кульминации спутника.

Использование триангуляционной методики в ГНСС-диагностике ионосферы накладывает ограничение на характерные горизонтальные размеры неоднородностей, которые должны быть больше расстояний между пунктами наблюдений. Еще одно ограничение при использовании статистического метода связано с погрешностью определения параметров ИН, возникающей из-за перемещения зоны прохождения сигналов спутника через ионосферу со скоростью (50 ÷ 70 м/с), сопоставимой с характерной горизонтальной скоростью (100 ÷ 300 м/с) перемещающихся ионосферных возмущений. Путем компьютерного моделирования было установлено, что погрешность определения азимута составляет в среднем 10° , а скорости – около 20 % при скоростях ИН свыше 100 м/с и пространственных масштабах неоднородностей больше 200 км. При усреднении по данным нескольких одновременно наблюдаемых спутников ошибки результатов уменьшаются. Моделирование проводилось для реальных траекторий движения спутников, для различных масштабов, скоростей и направлений распространения неоднородностей ПЭС в виде плоских бегущих волн.

При расчетах использовались ряды вариаций ПЭС, полученные при углах места спутника более 30° и длительностью не менее 3.5 ч. В среднем данному критерию удовлетворяют пролеты, в которых максимальный угол места больше 60° . Максимальные длительности регистраций, дос-

тигающие четырех – пяти часов, наблюдались для пролетов, в которых угол места спутника превышал 70° .

3. Обсуждение и интерпретация результатов

Синхронные вариации ПЭС, полученные по данным ГНСС станций, имеют различную степень подобия, коэффициент попарной корреляции в некоторых случаях превышает 0.9. В настоящей работе для исключения случайных мелкомасштабных ионосферных вариаций не рассматривались данные, для которых коэффициент корреляции ниже 0.4. Вариации с большими коэффициентами корреляции (90 % от общего количества пролетов) характеризуются периодами в диапазоне от 20 мин до 1.5 ч и наблюдаются в разное время суток и года с различной амплитудой. На рис. 2 показаны примеры характерных временных рядов δ ПЭС вдоль луча зрения “спутник – приемник” для четырех станций в двух произвольно выбранных пролетах спутника GPS PRN09. Единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit), равная 10^{16} м⁻².

Для сравнительной оценки сезонно-суточных вариаций ПЭС в исследуемом регионе были использованы данные глобальных ионосферных карт. На рис. 3 показаны временные зависимости абсолютной величины ПЭС (рис. 3, а) и СКО δ ПЭС (рис. 3, б) в координатах “время суток – сезон года”, построенные по данным наблюдений в течение 15 месяцев. Из сопоставления рис. 3, а и рис. 3, б видно, что тенденция временного хода СКО δ ПЭС в общем виде повторяет тенденцию временного хода ПЭС. Уровень вариаций электронного содержания в ионосфере, как правило, пропорционален его абсолютному значению, что соответствует результатам, полученным ранее при анализе индекса ионосферной активности в средних широтах [8].

Временные сдвиги между вариациями ПЭС, полученные в результате кросс-корреляционного анализа, как функции времени суток показаны на рис. 4. Можно отметить присутствие суточного хода τ . Наличие ненулевых временных сдвигов и высокое подобие регистрируемых временных вариаций ПЭС ионосферы позволяет предположить, что существует регулярное суточное горизонтальное движение неоднородностей.

Исходя из попарных временных сдвигов между вариациями ПЭС в каждом пролете для 450 суток, с апреля 2009 г. по июнь 2010 г., (рис. 4) были получены оценки направлений и скоростей

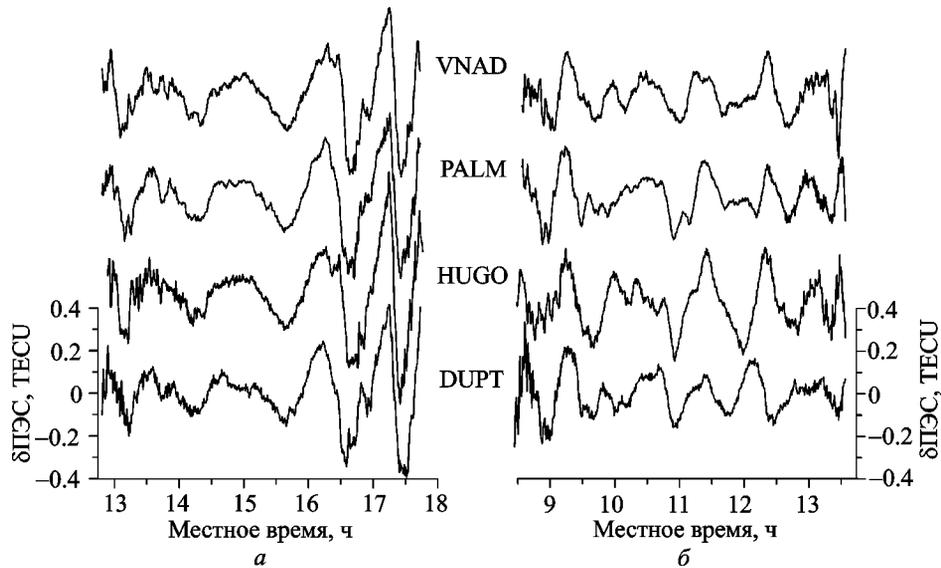


Рис. 2. Временные ряды вариаций ПЭС после удаления полиномиального тренда для четырех станций, полученные 14 января (а) и 16 марта (б) 2010 г.

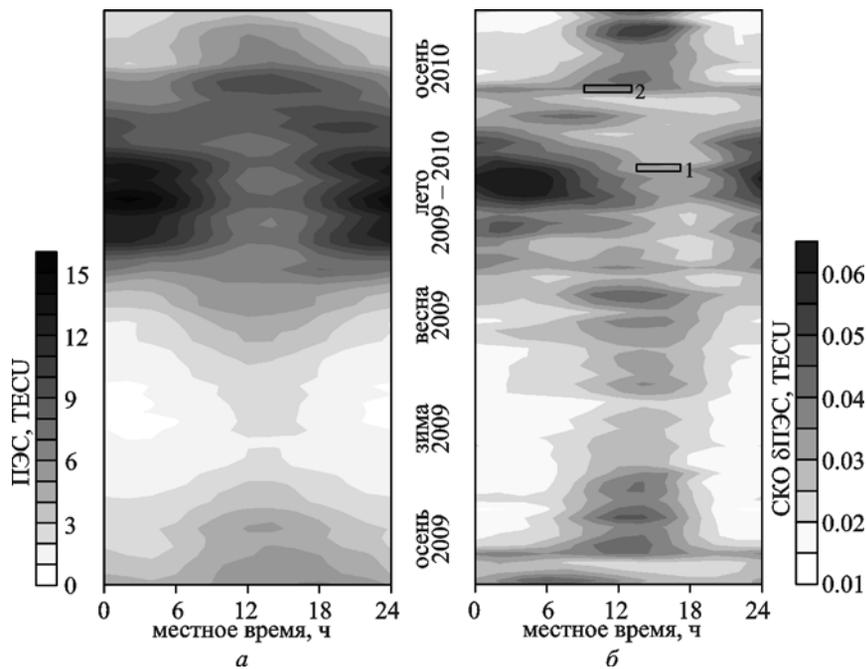


Рис. 3. Временные зависимости ПЭС (а) и СКО δ ПЭС (б) в координатах “время суток – сезон года”. Прямоугольниками 1 и 2 обозначены интервалы времени, в которые были получены данные, показанные на рис. 2.

движения ИИ. Массив данных для более чем 13 тысяч пролетов был разделен на группы по сезонам и по местному времени. На рис. 5 показаны гистограммы распределений скоростей ионосферных возмущений для различных сезонов года в южном полушарии, построенные для четырех шестичасовых интервалов в суточном цикле.

Форма распределения скоростей зависит от времени суток и от сезона. Подобные распределения наблюдались весной, зимой и осенью, в то время как летние распределения имеют заметные отличия. В сезоны, когда наблюдается “нормальный” суточный ход ионосферных параметров, более “узкое” распределение скоростей характерно для

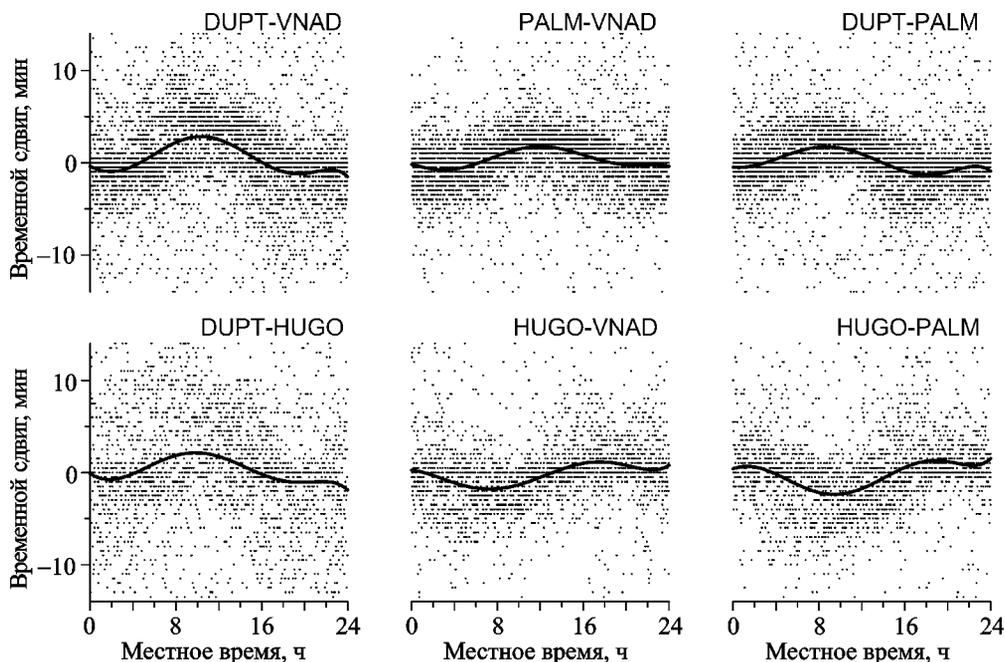


Рис. 4. Зависимости попарных временных сдвигов вариаций ПЭС от времени суток для четырех станций, построенные по всему массиву данных. Точки показывают результаты в каждом пятом пролете, линии – полиномиальная аппроксимация 6 степени

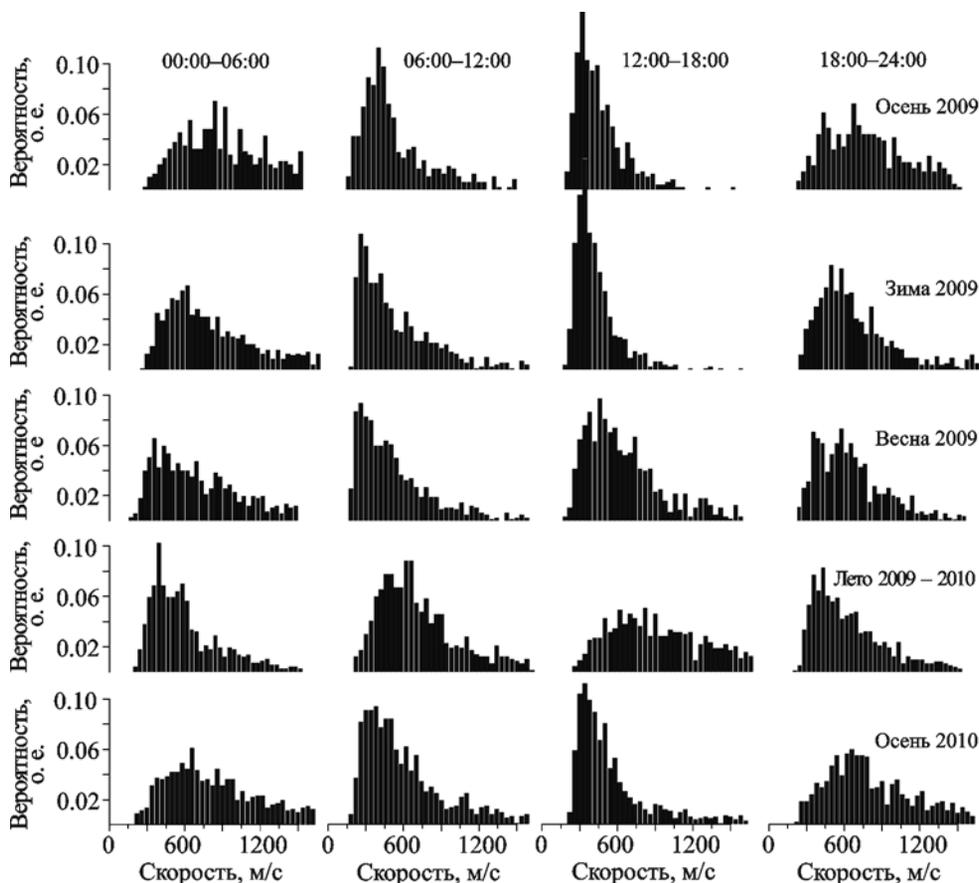


Рис. 5. Гистограммы распределений скоростей движения ионосферных возмущений в зависимости от времени суток и сезона

дневного времени. Наиболее вероятная скорость движения неоднородностей в этом случае составляет $300 \div 500$ м/с. Скорости выше 1500 м/с маловероятны. В ночное и вечернее время увеличивается разброс скоростей движения ИН и максимум смещается в область больших значений. Ионосферная аномалия проявляется в том, что форма распределения, характерная для зимнего дневного времени, летом наблюдается ночью.

На рис. 6 представлены угловые распределения, характеризующие вероятности наблюдаемых направлений движения ИН. В большинстве случаев обнаруживается выделенное направление, в котором движутся неоднородности. Например, с 6 до 12 ч местного времени во все сезоны, кроме лета, неоднородности движутся преимущественно в направлении на северо-восток. В вечернее время, с 18 до 24 ч, осенью и зимой преимущественное направление – северо-запад. В это же

время суток весной и летом преобладает юго-западное направление движения ИН. Для интервала времени с 12 до 18 ч характерно сравнительно широкое распределение направлений движения, в диапазоне около 90° , осенью и зимой и бимодальное распределение с противоположными доминирующими направлениями летом. В ночное время, с 0 до 6 ч, только для зимы характерен сравнительно узкий диапазон направлений, для остальных сезонов трудно выделить преимущественное направление движения неоднородностей.

4. Выводы и направления дальнейших исследований

Проведены многопозиционные исследования вариаций ПЭС над Антарктическим полуостровом в 2009–2010 гг. по данным локальной сети ГНСС-приемников. Применение триангуляционной методики к данным наблюдений позволило оценить ско-

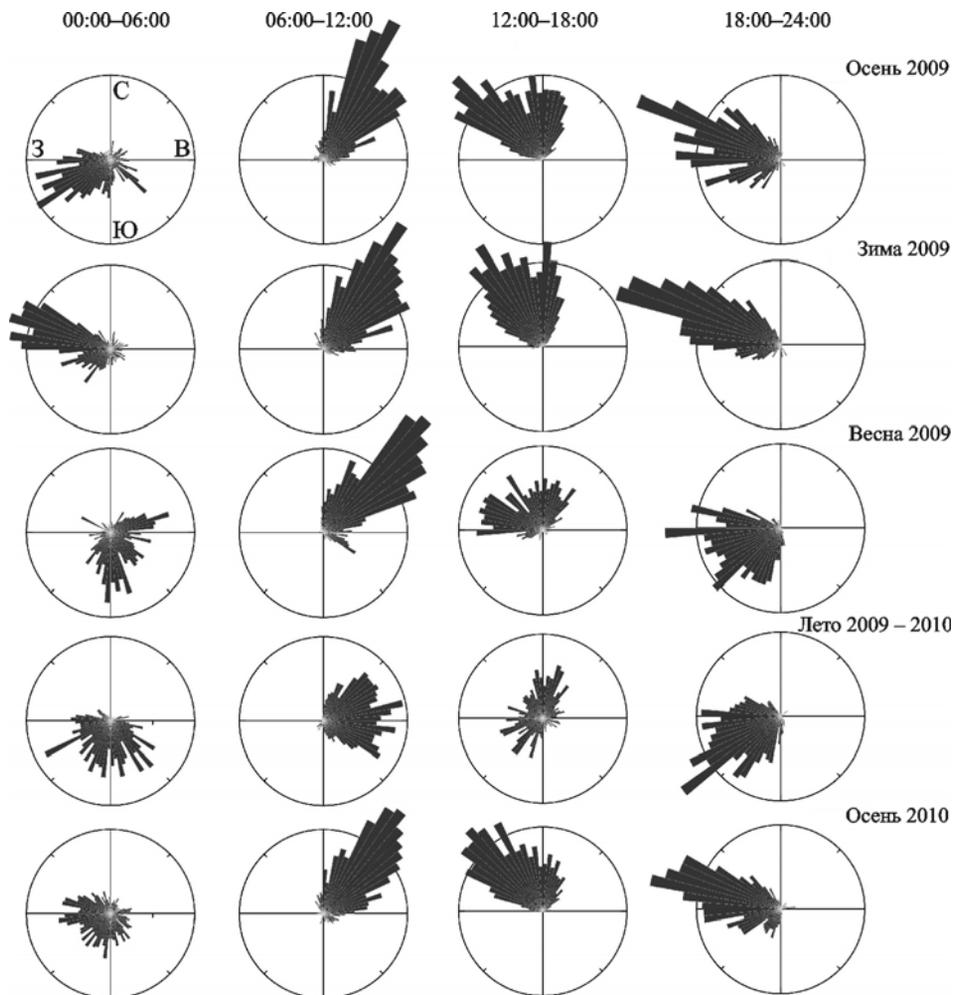


Рис. 6. Угловые распределения направления движения ионосферных возмущений в зависимости от времени суток и сезона

рости и направления движения ИН и исследовать динамику суточных вариаций параметров ИН над Антарктическим полуостровом для различных сезонов года.

Полученные результаты исследований позволяют предположить, что вариации электронного содержания высокоширотной ионосферы в регионе Антарктического полуострова имеют устойчивый характер. Они содержат фоновую составляющую в виде перемещающейся пространственно-временной структуры, параметры которой, а именно направление и скорость движения, регулярным образом изменяются в течение суток и зависят от сезона.

В дневное время ИН распространяются главным образом в северо-восточном направлении со скоростью около 300 ÷ 500 м/с, а вечером – на запад. Ночью движение возмущений имеет менее упорядоченный характер.

Предполагается, что в число параметров ионосферы с аномальным суточным ходом в регионе Антарктического полуострова наряду с известными [1, 2], такими, как критическая частота слоя F2 и ПЭС, можно включить также скорость движения фоновых ИН.

Дальнейшие исследования проводятся для других географических регионов, а также для Антарктического полуострова с использованием новых ГНСС данных, полученных в 2011 г., и при использовании других методов восстановления характеристик ИН.

Данные исследования проведены в рамках ведомственной НИР НАН Украины “Ятаган-2” (номер госрегистрации 0111U000063) при частичной финансовой поддержке конкурсных НИР НАН Украины “Шпицберген-2011” (номер госрегистрации 0111U003977) и “Збурення” (номер госрегистрации 0111U003979), а также в соответствии с рабочим планом НТР НАНЦ Украины “Гелиомакс” (номер госрегистрации 0111U007683).

Авторы статьи благодарны участникам семинара Отдела радиофизики геокосмоса Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины за обсуждение и поддержку результатов исследования, и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. He M., Liu L., Wan W., Ning B., Zhao B., Wen J., Yue X., and Le H. A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC // J. Geophys. Res. – 2009. – Vol. 114, A12309, doi:10.1029/2009JA014175.
2. Князева М. А., Зубова Ю. В., Намгаладзе А. А. Численное моделирование аномалии моря Уэдделла в поведении F2-области ионосферы // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13, № 4/2. – С.1068–1077.
3. Hernandez-Pajares M., Juan J. M., and Sanz J. Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 111, A07S11, doi:10.1029/2005JA011474.
4. Wang M., Ding F., Wan W., Ning B., and Zhao B. Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms // Earth Planets Space. – 2007. – Vol. 59. – P. 407–419.
5. Chen W.-Sh., Lee Ch.-Ch., Chu F.-D., and Su Sh.-Y. Spread F, GPS phase fluctuations, and medium-scale traveling ionospheric disturbances over Wuhan during solar maximum // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2011. – Vol. 73, Is. 4. – P. 528–533.
6. Силин П. В., Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М. Эффекты ионосферного F-рассеяния на антарктической станции “Академик Вернадский” // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 30–37.
7. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
8. Лисаченко В. Н., Занимонский Е. М., Ямпольский Ю. М., Вельгош П. Исследование вариаций полного электронного содержания ионосферы в регионе Антарктического полуострова // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 20–32.
9. Занимонский Е. М., Зализовский А. В., Лисаченко В. Н., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Ионосферные вариации над Европой, стимулированные мощным атмосферным фронтом // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 2, – С. 164–170.

*А. О. Сопін, Є. М. Занімонський,
В. М. Лисаченко, Ю. М. Ямпольський*

Радиоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ФОНОВИХ ВАРІАЦІЙ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ ІОНОСФЕРИ НАД АНТАРКТИЧНИМ ПІВОСТРОВОМ

Надаються результати досліджень варіацій повного електронного вмісту іоносфери над Антарктичним півостровом за даними локальної мережі перманентних станцій ГНСС упродовж 450 діб у 2009–2010 рр. Проаналізовано добові залежності швидкостей та напрямків руху іоносферних неоднорідностей для різних сезонів. У денний час неоднорідності поширюються переважно в північно-східному напрямку. У вечірній час восени і взимку найхарактернішим є північно-західний напрямок руху, навесні і влітку – південно-західний. Швидкості переміщення вдень складають приблизно 300 ÷ 500 м/с. У нічний час іоносферні неоднорідності поширюються у ширшому діапазоні швидкостей і напрямків.

*A. O. Sopin, Y. M. Zanimonskiy, V. N. Lisachenko,
and Y. M. Yampolski*

Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

FEATURES OF BACKGROUND VARIATIONS
IN TOTAL ELECTRON CONTENT OF IONOSPHERE
OVER THE ANTARCTIC PENINSULA

Variations in the total electron content over the Antarctic Penin-
sula are investigated using data from a local network of perma-

nent GNSS stations for 450 days within 2009 and 2010. Diurnal and seasonal dependences of velocities and directions of motion of ionospheric inhomogeneities are analyzed. In the daytime, inhomogeneities propagate predominantly north-eastwards for all seasons with velocities 300 to 500 m/s. While in the evening, the north-western and south-western directions are prevailing for autumn-winter and spring-summer periods, respectively. The nighttime ionospheric irregularities are characterized by a wider range of velocities and motion directions as compared with the daytime ones.

Статья поступила в редакцию 23.12.2011