

## Исследование вариаций полного электронного содержания ионосферы в регионе Антарктического полуострова

В. Н. Лисаченко, Е. М. Занимонский, Ю. М. Ямпольский, П. Вельгош<sup>1</sup>

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

*<sup>1</sup>Варминьско-Мазурский университет в Ольшане,  
ул. Михала Очаповского, 2, 10-719 Ольштын, Польша  
E-mail: pawel.wielgosz@uwm.edu.pl*

*Статья поступила в редакцию 28 февраля 2007 г.*

Изложены основные положения и предварительные результаты проверки методики идентификации перемещающихся ионосферных возмущений по измерениям полного электронного содержания, проводимым в регионе Антарктического полуострова. Используются данные регистрации сигналов глобальной навигационной спутниковой системы, непрерывно осуществляемой с апреля 2005 г. на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”, а также данные с трех ближайших перманентных ГНСС-станций. Для проверки гипотезы об обнаружении волнообразных ионосферных возмущений был использован анализ одновременных измерений критической частоты F-слоя, регистрируемой методом вертикального зондирования ионосферы на станции.

Сделаны заключения о возможности стимулирования волновых структур в ионосфере прохождением у поверхности Земли мощных теплых погодных фронтов, наличием сильного приземного ветра и геомагнитной активностью.

### Введение

Настоящая работа посвящена исследованию вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы в регионе Антарктического полуострова для оценки влияния тропосферных возмущений и геомагнитной обстановки на формирование ионосферных неоднородностей. Основным источником данных, использованных в работе, является глобальная навигационная спутниковая система. Значительная часть измерений была выполнена на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” (до 1996 г. – “Майкл Фарадей”, Великобритания), расположенной вблизи Тихоокеанского побережья Антарктического полуострова. Географичес-

кие координаты станции – 65.25° ю. ш., 64.27° з. д.; геомагнитные – 50.1° ю. ш., 9.3° з. д. Станция находится в высоких географических и средних геомагнитных широтах в условиях сравнительно спокойного фонового уровня вариаций геомагнитного поля и параметров верхней ионосферы. В то же время этот регион является одним из самых метеорологически активных на земном шаре и представляется удачным местом для исследования процессов переноса возмущений от поверхности к верхней атмосфере. Индикатором прохождения мощных погодных фронтов могут служить вариации приземного давления, температуры и скорости ветра, а в качестве ионосферной реакции удобно использовать вариации полного

электронного содержания. Можно предположить, что одним из проявлений тропосферных возмущений являются атмосферные гравитационные волны (АГВ), которые на ионосферных высотах модулируют плотность плазмы и стимулируют появление перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Такие волнообразные процессы в свою очередь приводят к квазипериодическим вариациям ПЭС. В статье предпринята попытка разработать методику идентификации ПИВ над УАС по регистрациям полного электронного содержания в регионе Антарктического полуострова.

### Современное состояние исследований возмущений ПЭС

Сегодня известно, что источником крупномасштабных ПИВ являются авроральные электроструи, в то время как “генератором” среднемасштабных ПИВ могут быть тропосферные возмущения [1, 2]. АГВ, возбуждаемые в приземном слое мощными метеорологическими процессами, распространяются вверх и достигают ионосферных высот [3]. Локальные вариации давления и плотности газа в такой волне, проходящей через ионосферу, могут приводить к квазипериодическим изменениям концентрации плазменной компоненты, которые в дальнейшем идентифицируются как ПИВ. Длины АГВ в ионосфере могут изменяться в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен километров, а соответствующие им периоды колебаний параметров ионосферного газа составляют десятки минут – часы. Амплитуда вариаций концентрации электронов оценивается величиной от единиц до десятка процентов относительно невозмущенного состояния [4].

Наблюдения АГВ и ПИВ проводятся различными методами. Для этого используются радары некогерентного рассеяния [1, 5], установки когерентного КВ зондирования [6], спутниковые радио-томографические наблюдения [7, 8]. Широкие возможности для исследований пространственно-временной динамики региональных ионосфер-

ных процессов предоставляют данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [9, 10, 11]. Функционируют две такие системы: американская – Global Position System (GPS), и российская – ГЛОБАЛЬНАЯ НАвигационная Спутниковая Система (ГЛОНАСС), которая пока не имеет полного состава спутников. В состав GPS входят три основных сегмента: космический, наземный и пользовательский. Космический сегмент состоит из 28 автономных спутников, распределенных по орбитам с высотой 20350 км (для полнофункциональной работы системы достаточно 24 спутников). Каждый спутник излучает специальный навигационный сигнал на двух частотах, в котором зашифровано два вида информационного кода. Один из них доступен лишь специальным пользователям, среди которых военные и федеральные службы США. Кроме этого сигнала, спутник излучает еще один, информирующий о функциональных параметрах космического аппарата (состоянии спутника и работоспособности бортовой аппаратуры). Параметры орбит спутников периодически контролируются сетью наземных станций слежения (5 опорных пунктов находятся в тропических широтах). С их помощью вычисляются баллистические характеристики, регистрируются отклонения космических аппаратов от расчетных траекторий движения, определяется собственное время бортовых часов, осуществляется мониторинг функционирования навигационной аппаратуры и др.

Основная часть третьего сегмента ГНСС – это приемники, выпускаемые и как автономные приборы (переносные или стационарные), и как сменные платы для подключения к бортовым или портативным компьютерам. К этому сегменту можно отнести также различные службы, национальные и международные, которые предоставляют услуги конечным пользователям, принимая и обрабатывая спутниковые сигналы. Наибольшей из них является International GNSS Service – IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/>), добровольное некоммерческое объедине-

ние более двухсот различных организаций по всему миру. Такие службы предоставляют свои ресурсы и перманентные станции GPS и ГЛОНАСС в общее пользование для научных и образовательных целей. Служба IGS открыта также для тестирования создаваемой в настоящее время европейской навигационной системы GALILEO.

Вариации электронной концентрации на трансионосферных радиопутьях и, как следствие, кажущиеся смещения положения спутников относительно наземного наблюдателя приводят к ошибкам в определении локальных координат пользователя и погрешностям временной синхронизации. На основе разностно-фазовых измерений приращения расстояния между спутником и приемником на двух когерентных частотах  $f_1 = 1575.42$  МГц и  $f_2 = 1227.60$  МГц имеется возможность оценки наклонного полного электронного содержания (НПЭС)  $I$  вдоль луча зрения [10, 12]:

$$I = K \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[ \left( L_2 \frac{c}{f_2} - L_1 \frac{c}{f_1} \right) + \text{const} + \Delta I \right],$$

где коэффициент  $K = 1/40.3083 \text{ c}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $L_1 c/f_1$  и  $L_2 c/f_2$  – фазовые пути радиосигналов на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , м;  $L_1$  и  $L_2$  – числа фазовых циклов (целые и дробные части);  $c$  – скорость света, м/с; const – некоторый неизвестный начальный фазовый путь, м;  $\Delta I$  – ошибка в определении фазового пути, м. Единицей НПЭС является общепринятая в литературе, величина TECU (Total Electron Content Unit), равная  $10^6 \text{ м}^{-2}$ . Измерения приращений фазы в ГНСС производятся с высокой точностью, при которой ошибка определения вариаций НПЭС в 30-секундных интервалах усреднения оценивается величиной  $10^{-2}$  TECU.

Большая часть данных, накапливаемых глобальной сетью перманентных станций, общедоступна в Интернете в исходном виде. По ним вычисляются и также размещаются в Интернете временные ряды “ви-

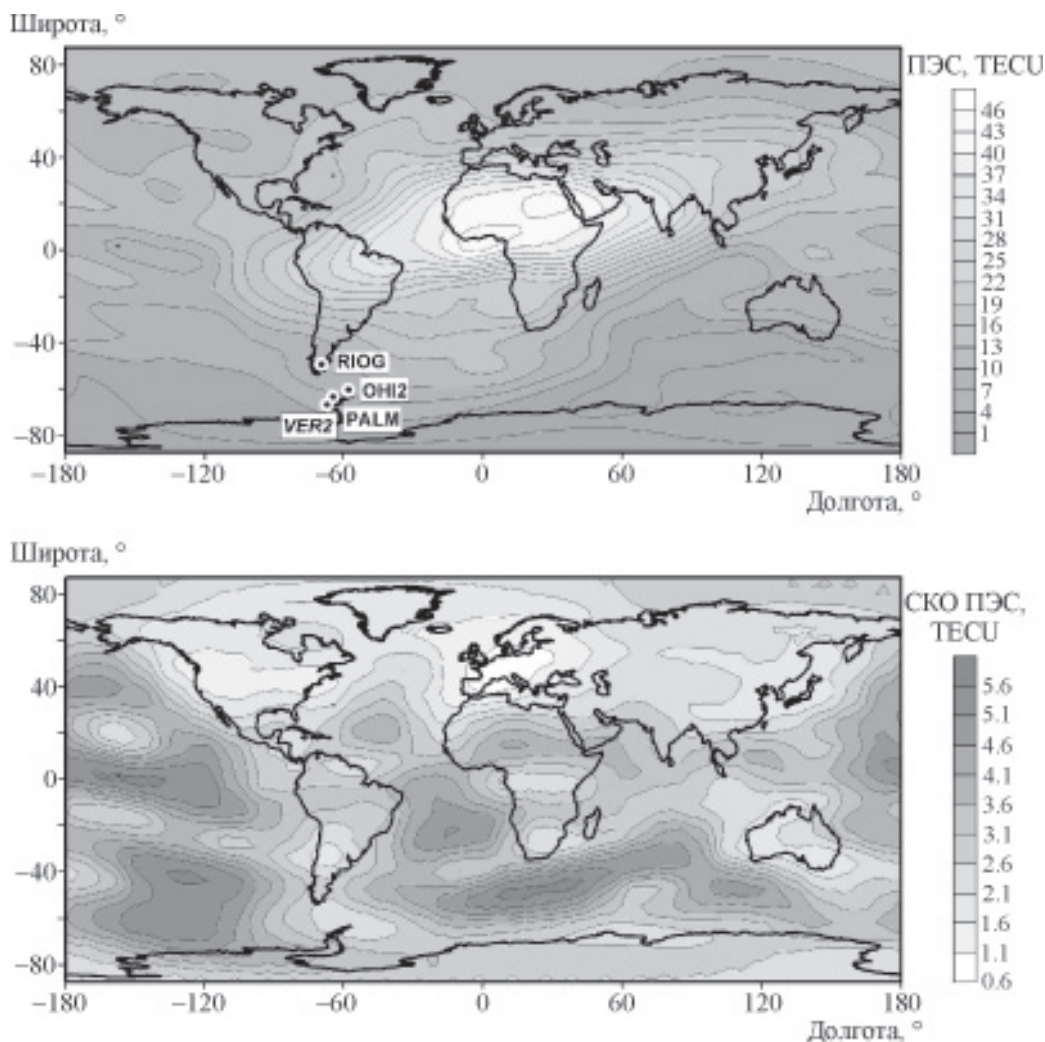
димых” координат перманентных станций и параметров тропосферы в их окрестностях, а также глобальные ионосферные карты – Global Ionospheric Maps – GIMs. При построении карт используется модель ионосферы в виде тонкого слоя – Single Layer Ionospheric Model (SLIM), к которому приведено все интегральное электронное содержание ионосферы [12]. Такая модель [13, 14] была принята при разработке GPS и, в основном, удовлетворяет требованиям по точности учета ионосферных эффектов в навигационных и геодезических приложениях ГНСС. Использование модели тонкого слоя позволяет существенно упростить пространственно-временное описание ионосферы.

Пространственными переменными в таком представлении являются координаты (например, географические или геомагнитные) подионосферных точек – проекций на земную поверхность координат пересечения луча зрения “спутник–приемник” с тонким ионосферным слоем на высоте 450 км. На этих картах представлено глобальное распределение ПЭС в узлах сетки с шагом  $2.5^\circ$  по широте,  $5^\circ$  по долготе и 2 ч по времени, отражающее общие тенденции изменений в ионосфере, например суточную и сезонную цикличности, реакцию на планетарные волны и геомагнитные возмущения. Данные такого картографирования в виде ежесуточных таблиц доступны на сайте <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. Карта представляет собой сглаженную картину, математически она моделируется рядом по сферическим гармоникам 15-го порядка до 15-й степени. Достоинства такой модели являются несомненными, прежде всего потому, что обеспечивается наглядное представление ПЭС над обширными регионами с малой плотностью перманентных станций. Но сглаженный характер пространственного распределения ПЭС и двухчасовая дискретность по времени не позволяют проводить исследования относительно быстрых локальных процессов в ионосфере.

### Методика измерений

На рис. 1 в качестве примера показаны карты ПЭС и его среднеквадратичных отклонений (СКО ПЭС), построенные по данным указанного выше сайта. Вспомогательная карта СКО ПЭС позволяет оценить глобальное распределение погрешности построения основной карты, которое отражает “густоту” покрытия permanentными станциями того или иного региона земной поверхности (чем больше их пространственная плотность, тем меньше погрешность). Для Антарктиды и зоны вокруг нее состав-

ление ионосферных карт, вообще говоря, затруднительно из-за малого числа станций в этом регионе. Тем не менее именно над проливом Дрейка вблизи Антарктического полуострова погрешность воссоздания карты ПЭС относительно невелика (рис. 1) благодаря сравнительно плотному расположению трех permanentных станций (PALM – США, OHI2 – Чили, RIOG – Аргентина). Первая и вторая из них находятся в Антарктике, а третья – на юге Латинской Америки. В рамках настоящей работы, применяя простые, но оригинальные приемы обработки первичных данных,



**Рис. 1.** Глобальные карты ПЭС (вверху) и СКО ПЭС (внизу) для 14 часов UT 7 июня 2005 г. Изолинии ПЭС проведены с интервалом 3 TECU, а изолинии СКО ПЭС – 0.5 TECU

совместно с использованием глобальных карт удалось получить наглядное представление о некоторых динамических особенностях поведения ионосферы в районе пролива Дрейка. Существенным фактором реконструкции ПЭС в этом регионе было использование данных, полученных с помощью 12-канального двухчастотного приемника GPS ASHTECH Z-XII, установленного с участием авторов этой работы на УАС 3 апреля 2005 г. Новый пункт размещения приемной аппаратуры получил международное обозначение VER2 (<http://www.tu-dresden.de/ipg/service/scargps/VER1.html>). На рис.1 этот пункт отмечен совместно с тремя перманентными станциями.

Приемник предоставлен украинским ученым коллегами из Института геодезии и картографии в Варшаве.

Очевидно, что, осуществляя поиск сравнительно “быстрых” (десятки минут – часы) вариаций ПЭС, необходимо было проанализировать более медленные, регулярные, фоновые особенности изменения ПЭС. К ним прежде всего следует отнести сезонные и суточные циклы. На рис. 2, а в качестве примера показана годовая зависимость ПЭС над УАС от времени в координатах “время суток – день в году”, построенная по данным GIMs за 2005 г. Качественный анализ годовых вариаций отражает специфическое сезонно-суточное поведение ПЭС в Западной Антарктике. В январе, феврале и марте суточный цикл имеет нестабильный характер (антарктическое лето). К концу марта устанавливается “классический” вид суточной зависимости с доминирующим периодом 24 ч и максимумом ПЭС вблизи локального полудня. До конца мая среднесуточная величина ПЭС монотонно уменьшается и достигает минимального значения в июне (начало антарктической зимы). С июля увеличиваются средняя величина и амплитуда вариаций ПЭС в суточном цикле, который постепенно становится неустойчивым. С середины ноября до середины января суточный цикл как бы “инвертируется” относительно зимнего поведения – максимум

ПЭС наблюдается ночью. Для сравнения на рис. 2, б показана зависимость критической частоты слоя F2 ионосферы от времени в координатах “время суток – день в году”, построенная по данным ионосферной станции на УАС. Можно отметить высокую степень подобия вариаций этих двух параметров. Примечательно, что над Восточной Антарктикой ионосфера в основном сохраняет регулярность суточного поведения ПЭС [15].

Для предварительного анализа вариаций ПЭС и поиска периодических ионосферных неоднородностей был выбран двухнедельный интервал измерений с 1 по 14 июня (152–165 дни 2005 г.), когда ионосфера характеризовалась сравнительно спокойным поведением фоновых вариаций. В этот же период Западное побережье Антарктического полуострова отличалось интенсивной тропосферной активностью (по данным многолетних метеорологических наблюдений на УАС около 60 % циклонов приходится на зимний период года). В течение анализируемого интервала времени имели место как магнитно спокойные, так и дни с повышенной геомагнитной активностью, было отмечено также прохождение теплового (4 июня) и холодных (5 и 6 июня) тропосферных фронтов. В качестве информационных параметров, иллюстрирующих состояние тропосферной погоды, были выбраны скорость приземного ветра [16], температура, скорость ее изменения, вариации приземного давления и их вторая производная. “Космическая погода” описывалась трехчасовыми *K*-индексами, определявшимися по данным наблюдений геомагнитного поля на УАС (рис. 3).

Первичные данные с трех перманентных станций (PALM, ONI2, RIOG), ближайших к исследуемому району, а также регистрации, полученные на УАС, обрабатывались с помощью пакета прикладных программ MP GPS™, разработанного в Университете штата Огайо (США) для получения геодезических ГНСС-решений и для моделирования ПЭС в региональном масштабе [17]. Из первичных данных для обработки от-

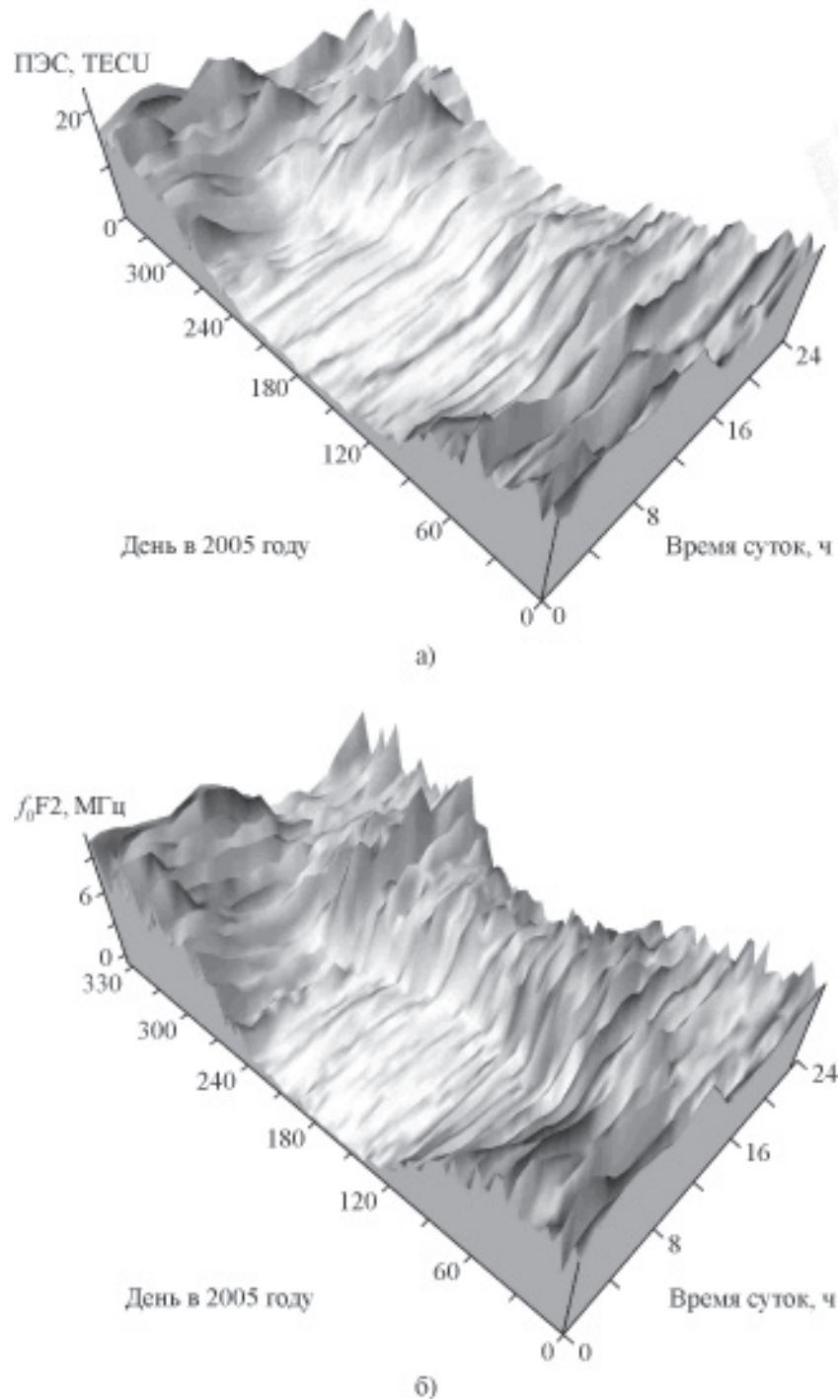
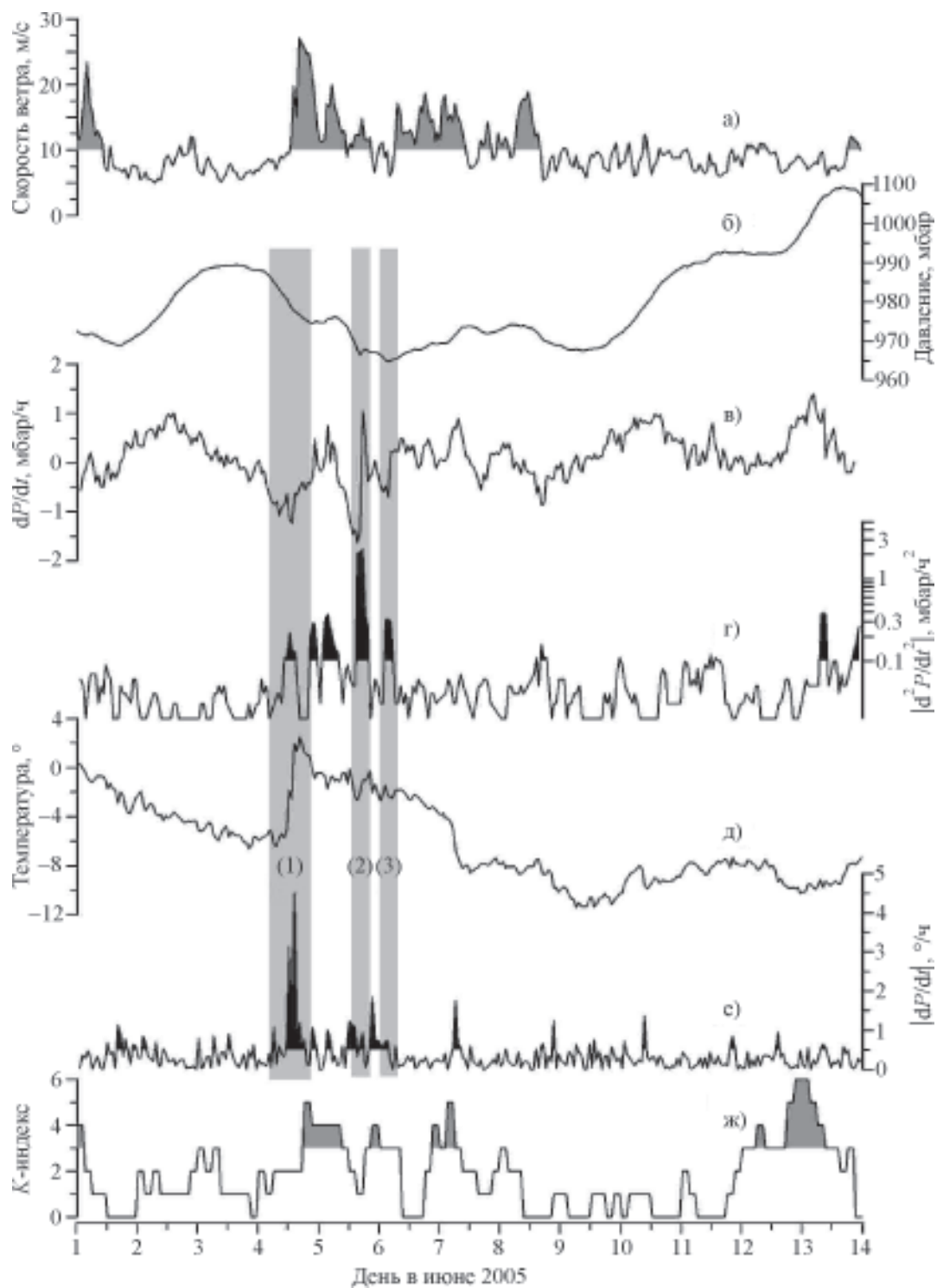


Рис. 2. Временной ход ПЭС (а) и критической частоты слоя F2 (б) над проливом Дрейка в 2005 г.

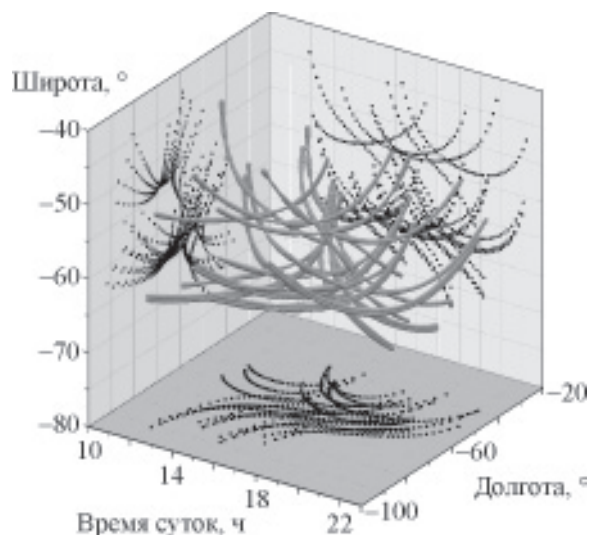
бирались только такие пролеты спутников, продолжительность которых была не менее четырех часов. Это условие необходимо для

поиска квазипериодических вариаций ПЭС с периодами от десятков минут до двух часов (соответствующие пространственные



**Рис. 3.** Характеристики метеорологической обстановки: (а) – скорость ветра, (б) – давление, (д) – температура, (в) – производная давления по времени и (е) – производная температуры по времени, (г) – вторая производная давления по времени, (ж) – индекс геомагнитной активности на УАС в июне 2005 г. Отмечено прохождение теплого (1) и холодных (2 и 3) фронтов. Заливкой показаны значения параметров, выше условных “спокойных” пороговых уровней

масштабы АГВ – от сотни до тысяч километров). Для более детального анализа были отобраны данные, соответствующие дневному и вечернему времени (с 12 до 21 ч UT), для которого вариации ПЭС в несколько раз превышали ночной уровень изменений. По известной методике [9, 10, 11] из первичных данных четырех станций (PALM, ONI2, RIOG, VER2) формировались временные ряды НПЭС вдоль лучей зрения “спутник–приемники”. В качестве медленного (регулярного) тренда для их центрирования использовались значения НПЭС, полученные для этого же региона путем пространственно-временной интерполяции данных глобального картографирования GIMs. После исключения тренда центрированные вариации НПЭС пересчитывались с помощью проектирующей функции [11] к вертикальному направлению, формируя временные ряды для вариаций ПЭС. На рис. 4 показано трехмерное (в пространстве географические координаты – время суток (UT)) распределение подионосферных точек семи спутников, наблюдавшихся не менее 4 ч одновременно на четырех станциях (PALM, ONI2, RIOG,



**Рис. 4.** Распределение подионосферных точек в зависимости от долготы, широты и времени в однодневном сеансе наблюдений

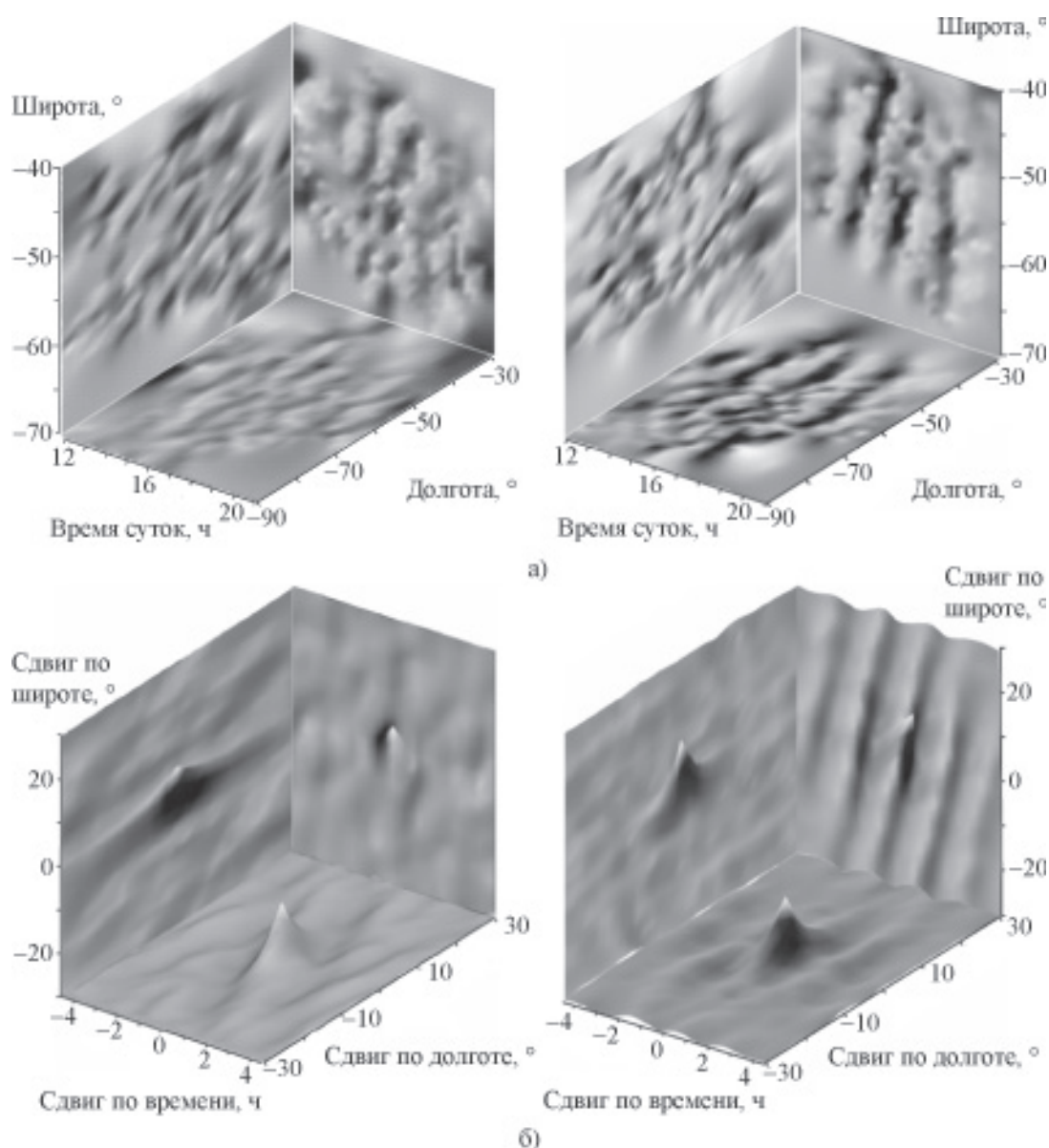
VER2). Толщина линий пропорциональна вариациям ПЭС. Таким образом, данные по каждому пролету, после выделения тренда, представляют собой совокупность неэквидистантных выборочных отсчетов значений поля вариаций ПЭС по траектории подионосферной точки.

## Результаты измерений

Пространственно-временная картина вариаций ПЭС как функция трех аргументов может быть представлена на рисунке в виде проекций на три плоскости “время–долгота”, “время–широта” и “долгота–широта”. В качестве примеров на рис. 5, а показаны такие проекции для двух характерных дней из выбранного двухнедельного интервала измерений. При нахождении каждой из проекций использовалась интерполяция значений ПЭС для неэквидистантных отсчетов к узлам равномерной сетки по каждой паре координат методом “минимальной кривизны”. Интерполированная поверхность, полученная таким образом, подобна форме тонкой упругой пластины, проходящей в ближайшей окрестности каждой точки исходных данных с минимальным изгибом. Как показали результаты численных экспериментов, для анализируемых данных этот метод, по сравнению с другими методами интерполяции, давал поверхности с наименьшими “выбросами” на границах. При этом экстраполяция вне зон расположения основного массива данных не использовалась.

Полученные вариации ПЭС обрабатывались методами корреляционного и спектрального анализа. На рис. 5, б показаны двумерные автокорреляционные функции (АКФ) трех проекций ПЭС для 4 и 7 июня 2005 г. Как видно из рис. 5, а и 5, б, пространственно-временное поведение самих вариаций ПЭС и АКФ отличается в эти дни. Для реализации, полученной 7 июня, наблюдается периодическая структура вариаций в долготном и широтном направлениях, в то время как 4 июня изменения ПЭС носят хаотический характер. Еще бо-





**Рис. 5.** Проекция пространственно-временного поля вариаций ПЭС (а) и соответствующие двумерные автокорреляционные функции (б) в регионе Антарктического полуострова 4 июня (слева) и 7 июня (справа) 2005 г.

лее наглядными эти качественные отличия становятся при спектральном анализе. На рис. 6, а представлены временные и пространственные периодограммы вариаций ПЭС для семи суток наблюдений с 3 по 9 июня. В спектрах вариаций ПЭС по широте 6 и 7 июня отчетливо наблюдается периодическая компонента с масштабом око-

ло двух тысяч километров. Оценить длину такой волны более точно не представляется возможным из-за ограниченности пространственной зоны, в которой происходит радиопросвечивание ионосферы сигналами ГНСС (40 на 25° по долготу и широте, или 2200 на 2800 км в модели плоской Земли). Периодическая широтная компо-



мя–долгота” для 7 июня, можно интерпретировать их наиболее вероятным образом как проявление волны в ионосфере, распространяющейся практически в восточном направлении (азимут около  $80^\circ$ ) с горизонтальной скоростью  $V \geq 50$  м/с при длине волны  $\Lambda \approx 340$  км. Следует отметить, что такое направление движения ПИВ совпадает с преимущественным направлением перемещения атмосферных погодных фронтов в этом регионе Антарктики, с запада на восток. Это обстоятельство может служить еще одним свидетельством в пользу гипотезы о возбуждении волновых процессов в тропосфере и их распространении на высоты верхней ионосферы.

Для проверки методики обнаружения периодических вариаций ПЭС и восстановления параметров ПИВ было предпринято сопоставление данных радиопросвечивания ионосферы с результатами синхронных измерений характеристик высотного профиля электронной концентрации, регистрируемых методом вертикального зондирования ионосферы на УАС “Академик Вернадский”. В качестве информационного параметра были проанализированы 15-минутные изменения критической частоты F-слоя  $f_c$ , в которых наиболее часто проявляются эффекты средне- и крупномасштабных волновых возмущений [18]. На рис. 6, б представлены синхронные временные ряды вариаций  $f_c$  для F-слоя и ПЭС (буквой  $R$  обозначены коэффициенты взаимной корреляции). Сопоставление поведения обеих величин показывает их хорошее соответствие для 5, 6 и 7 июня и практически отсутствие подобия для 3, 4, 8 и 9 июня. Еще раз напомним, что ранее проведенный спектральный анализ вариаций ПЭС выявил отчетливые пространственно-временные периодичности именно для первых трех дней наблюдений. Таким образом, четырехпозиционные измерения ПЭС в регионе пролива Дрейка и Антарктического полуострова позволяют выделять средне- и крупномасштабные ПИВ на ионосферных высотах. В дальнейшем планируется

проведение “сквозной” обработки всего массива регистраций ПЭС, накопленных на УАС в течение двух лет (2005–2007 гг.).

## Выводы

1. В апреле 2005 г. на УАС развернут и запущен для непрерывной эксплуатации GPS-приемник, позволяющий с высокой точностью регистрировать изменения полного электронного содержания ионосферы в мониторинговом круглосуточном режиме.

2. Организация непрерывных измерений характеристик сигналов ГНСС в Антарктике на станции “Академик Вернадский” позволяет существенно улучшить пространственно-временное воспроизведение вариаций ПЭС в этом регионе и реконструировать волновые процессы на ионосферных высотах.

3. Разработана методика поиска, выделения и визуализации периодических вариаций на фоне регулярных суточных и сезонных изменений ПЭС. В период проведения экспериментов по радиопросвечиванию ионосферы над регионом Антарктического полуострова проанализирована текущая геофизическая обстановка, выделены интервалы тропосферных и геомагнитных возмущений.

4. Обнаруженные периодические вариации полного электронного содержания хорошо коррелируют с независимыми одновременными изменениями критической частоты F-слоя, регистрируемыми на УАС методом вертикального зондирования. Характерные горизонтальные масштабы волновых процессов могут быть примерно оценены в несколько сотен километров. Периоды таких волновых процессов варьируются в пределах от полутора до двух часов.

5. Двухнедельное сопоставление квазипериодических вариаций ПЭС с геофизической и метеорологической обстановкой в регионе зондирования позволяет сделать предварительные заключения о возможности стимулирования волновых структур в ионосфере прохождением у поверхности Земли мощных погодных фронтов.

6. Предыдущие два вывода (4 и 5) носят предварительный характер и нуждаются в дальнейшей проверке на более обширном массиве экспериментальных данных, накопленных на УАС в 2005–2007 гг.

Авторы считают необходимым поблагодарить НАНЦ МОНУ и ОФА НАН Украины за частичную поддержку этой работы в рамках НИР “Резонансы” (МОНУ) и “Циклон” (НАНУ). Мы также признательны участникам X-й сезонной Украинской антарктической экспедиции и лично Г. П. Милиневскому за помощь по установке антенны и ГНСС-приемника на станции “Академик Вернадский”. Ряд полезных замечаний и рекомендаций был высказан авторам работы участниками ионосферного семинара Отдела радиопизики геокосмоса Радиоастрономического института НАН Украины.

### Литература

- Prikryl P., Muldrew D. B., Sofko G. J., Ruohoniemi J. M. Solar wind Alfvén waves: a source of pulsed ionospheric convection and atmospheric gravity waves // *Ann. Geophys.* – 2005. – Vol. 23, No. 2. – P. 401-417.
- Lewis R. W. et al. The generation and propagation of atmospheric gravity waves from activity in the auroral electrojet // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – Vol. 58. – P. 807-820.
- Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №2. – С. 130-151.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995 // *Ann. Geophys.* – 1996. – Vol. 14, No. 9. – P. 917-940.
- Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 1. Kharkov Incoherent Scatter Radar Observations // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2006. – Vol. 46, No.2. – P. 183-198.
- Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Yu. M., Reinisch B. W., Paznukhov V. V., Foster J. C., Erickson P. J. Frequency-and-Angular HF Sounding and VHF ISR Diagnostics of TIDs. – *Radio Sci.* – 2003. – Vol. 38, No. 6. – P. 10-1–10-9.
- Шагимуратов И. И., Карпов И. В., Кшевецкий С. П., Ружин Ю. Я. Исследование структуры перемещающихся ионосферных возмущений на основе топографических экспериментов // *Геоматизм и аэрономия.* – 2001. – Т. 41, №3. – С. 394-399.
- High Frequency Active Auroral Research Program <http://www.haarp.alaska.edu/haarp/index.html>.
- Афраймович Э. Л., Косогоров Е. А., Лесюта О. С., Ушаков И. И. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2001. – Том XLIV, №10. – С. 828-839.
- Афраймович Э. Л., Башкуев Ю. Б., Бернгардт О. И., Гацуцев А. В., Дембелов М. Г., Шпынев Б. Г., Кобзарь В. А., Кушнарев Д. С., Мусин В. Ю., Пушкин П. Ю., Перевалова Н. П. Детектирование перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения частоты на радиопизическом комплексе ИСЗФ // *Геоматизм и аэрономия.* – 2004. – Т. 44, №4. – С. 463-475.
- Wielgosz P., Kashani I., Grejner-Brzezinska D., Zanimonskiy Y., Cisak J. Regional Ionosphere Modeling Using Smoothed Pseudoranges. // *SCAR Report.* – Cambridge, UK. – 2005. – No. 23. – P. 37-41.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Position System: Theory and Practice.* – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
- Scheuer P. A. G. Amplitude Variations in Pulsed Radio Sources // *Nature.* – 1968. – Vol. 218, No. 5145. – P. 920-922.
- Salpeter E. E. Pulsar Amplitude Variations // *Nature.* – 1969. – Vol. 221, No. 5175. – P. 31-33.
- Milnevsky G., Zanimonskiy Y., Cisak J., Olijnyk A., Olijnyk M. The electron content diurnal cycle variations in Antarctic ionosphere investigations using GNSS data. // *International Workshop “GPS in the IPY: The POLENET Project”.* – Dresden (Germany). – 2006. – <http://www.tu-dresden.de/ipg/polenet/>.
- Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М. Роль космической и тропосферной погодных систем в турбулизации верхней ионосферы. // *Труды VIII конференции молодых ученых “Астрофизика и физика околоземного космического пространства”, БШФФ.* – 2005. – С. 51-53.
- Kashani I., Grejner-Brzezinska D. A. and Wielgosz P. Towards instantaneous RTK GPS over 100 km distances. // *ION 60th AM.* – Dayton, Ohio (USA). – 2004. – pp. 679-685.
- Костюкевич С. М., Нагорский П. М., Цыби́ков Б. Б. Волновые возмущения в вечернее время на суточном ходе  $f_0F2$  // *Геоматизм и аэрономия.* – 2004. – Т. 44, №4. – С. 476-479.

**Дослідження варіацій повного  
електронного вмісту іоносфери у регіоні  
Антарктичного півострова**

**В. М. Лисаченко, Є. М. Занимонський,  
Ю. М. Ямпольський, П. Вельгош**

Викладено основні положення та попередні результати перевірки методики ідентифікації рухомих іоносферних збурень за вимірами повного електронного вмісту, отриманими у регіоні Антарктичного півострова. Використано дані реєстрації сигналів глобальної навігаційної супутникової системи, безперервно виконуваної з квітня 2005 р. на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”, а також дані з трьох найближчих перманентних GNSS-станцій. Для перевірки гіпотези про виявлення хвилеподібних іоносферних збурень був використаний аналіз одночасних вимірів критичної частоти F-шару, реєстрованої методом вертикального зондування іоносфери на станції.

Зроблено висновки про можливість стимулювання хвильових структур в іоносфері проходженням близько поверхні Землі потужних теплих погодних фронтів, наявністю сильного приземного вітру та геомагнітною активністю.

**Investigation of Ionospheric Total Electron  
Content Variations in the Antarctic  
Peninsula Region**

**V. N. Lisachenko, Y. M. Zanimonskiy,  
Yu. M. Yampolski, and P. Wielgosz**

Principles and preliminary check results of the strategy of traveling ionospheric disturbance identification by total electron content data measured in the Antarctic Peninsula region are presented. The Global Navigation Satellite System (GNSS) signal data recorded continuously since April, 2005 at the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky” and also the data from three nearest permanent GNSS stations are used here. To test the hypothesis on detection of wave-like ionospheric disturbances, the analysis of simultaneously measured F-layer critical frequency recorded with the method of ionosphere vertical sounding at the Station has been applied analysed.

The possibility about wave structures stimulation in ionosphere by passage of powerful warm weather fronts near the Earth’s surface, as well as by presence of a strong surface wind and by geomagnetic activity, is concluded.