

UDC 551.510.535 + 550.388

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АГВ ПО ДАННЫМ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ И КОГЕРЕНТНОГО ВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ «ВЕРНАДСКИЙ» И «ПАЛМЕР»**А. А. Сопин¹, Ю. М. Ямпольский¹, В. В. Пазнухов², С. Б. Кашеев¹, А. В. Колосков¹, И. И. Пикулик¹, А. В. Зализовский¹, А. С. Кашеев^{1,3}.**

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, ул. Искусств, 4, г. Харьков, 61002, Украина.

² Институт Научных Исследований, Бостон Колледж, Коммонвелс авеню 140, Честнат Хилл, Массачусетс, 02467, США.

³ Международный центр теоретической физики имени Абдуса Салама, Лаборатория телекоммуникаций и информационных технологий для развития (T/ICTD4D), Триест, Италия.

Реферат. Представлены результаты диагностики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) над Антарктическим полуостровом, которые были получены двумя разными методами. Первый метод основан на наземных многопозиционных измерениях полного электронного содержания (ПЭС), а второй – это двухпозиционное когерентное ВЧ радиозондирование ионосферы между антарктическими станциями «Академик Вернадский» и «Палмер». Проведено сравнение вариаций доплеровского сдвига частоты пробного ВЧ сигнала, принятого на станции «Палмер», с динамикой вариаций ПЭС. Квазипериодические вариации, ассоциируемые с распространением ПИВ, были зарегистрированы одновременно в обоих типах данных. Рассмотренный в работе случай показал, что параметры ионосферного возмущения, полученные двумя методами, хорошо согласуются, учитывая специальный выбор траекторий подионосферных точек ГНСС спутников вблизи точки отражения пробного ВЧ сигнала и распространении ПИВ в направлении, коллинеарном радиотрасе и перпендикулярном траектории движения подионосферной точки.

Ionospheric response to AGW propagation detected using GNSS measurements and coherent HF sounding over “Vernadsky” and “Palmer” Antarctic stations

A. A. Sopin, Yu. M. Yampolski, V. V. Paznukhov, S. B. Kascheev, A. V. Koloskov, I. I. Pikulik, A. V. Zalizovski and A. S. Kashcheyev

Abstract. The work presents results of the diagnostics of travelling ionospheric disturbances (TIDs) over the Antarctic Peninsula obtained by using two different techniques. The first method is based on ground-based multi-positional GNSS TEC measurements, and the second one is bistatic coherent ionospheric HF radio sounding between “Akademik Vernadsky” and “Palmer” Antarctic stations. A comparison of Doppler frequency shifts of the probe HF signal received at “Palmer” station with the dynamics of TEC variations has been made. Quasi-periodic variations associated with the propagation of TIDs were registered simultaneously in both types of the data. A case study performed in this

paper has shown that the parameters of the ionospheric disturbance estimated by two methods are in a good agreement, given a specific choice of ionospheric pierce point (IPP) trajectories of GNSS links near the reflection point of the HF probing signal and TID motion direction collinear to the radiopath and perpendicular to IPP trajectories.

Key words: GNSS diagnostics, HF radio sounding, TID, TEC, ionospheric irregularities.

Іоносферний відгук на поширення АГХ за даними ГНСС вимірювань і когерентного ВЧ зондування над антарктичними станціями «Вернадський» і «Палмер»

А. О. Сопін, Ю. М. Ямпольський, В. В. Пазнухов, С. Б. Кашеев, О. В. Колосков, І. І. Пікулік, А. В. Залізівський, А. С. Кашеев.

Реферат. Представлено результати діагностики рухомих іоносферних збурень (РІЗ) над Антарктичним півостровом, які було отримано двома різними методами. Перший метод базується на наземних багатопозиційних ГНСС вимірюваннях повного електронного вмісту (ПЕВ), а другий — це двопозиційне когерентне ВЧ радіозондування іоносфери між антарктичними станціями «Академік Вернадський» і «Палмер». Проведено порівняння варіацій доплерівського зсуву частоти пробного ВЧ сигналу, прийнятого на станції «Палмер», з динамікою варіацій ПЕВ. Квазіперіодичні варіації, асоційовані з поширенням РІЗ, було зареєстровано одночасно в обох типах даних. Розглянутий у роботі випадок показав, що параметри іоносферного збурення, отримані двома методами, добре узгоджуються враховуючи на спеціальний вибір траєкторій підіоносферних точок ГНСС супутників поблизу точки відбиття пробного ВЧ сигналу, і поширення РІЗ в напрямку колінеарному радіотрасі та перпендикулярному траєкторії руху підіоносферної точки.

1. Введение

Квазипериодические флуктуации электронной концентрации в ионосфере, вызванные распространением атмосферных гравитационных волн (АГВ), представляют особый интерес для исследования динамических процессов в ионосфере (Носке, 1996). ПИВ играют существенную роль в динамике ионосферы и Антарктический полуостров является одним из наиболее интересных мест для их изучения, поскольку характеризуется высокой интенсивностью АГВ (Grocott et al., 2013). Антарктический полуостров является одним из наиболее метеорологически активных регионов Земли, что делает его перспективным для экспериментальных исследований процессов тропосферно-ионосферного взаимодействия и распространения погодных возмущений от поверхности на ионосферные высоты (Ямпольский и др., 2004; Зализовский и др., 2007). Кроме этого, данный регион расположен в средних геомагнитных широтах и умеренный уровень фоновых вариаций в ионосфере облегчает обнаружение ионосферного отклика на распространяющиеся АГВ.

На Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (УАС) вертикальное зондирование ионосферы проводится более полувека. Регулярные измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с использованием сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) начались в 2009 году, когда на УАС была установлена перманентная GPS станция VNAD. Совместно с наблюдениями ГНСС станций PALM и DUPT (рис. 1) эти данные позволяют обнаруживать и восстанавливать характеристики волнообразных ионосферных неоднородностей. Ранее соавторами был выполнен статистический анализ многолетних многопозиционных данных вариаций ПЭС, который позволил восстановить суточно-сезонные закономерности поведения АГВ/ПИВ над Антарктическим полуостровом (Сопин и др., 2012; Galushko et al., 2016).

В январе–марте 2004 г. были проведены тестовые измерения параметров ПИВ на ВЧ радиотрасе между антарктическими станциями УАС и «Генрик Арцтовский» (Польша) (Галушко и др., 2007). Было показано, что характеристики ПИВ – такие как период, направление распространения и скорость – могут быть получены с помощью метода частотно-углового зондирования ионосферы (ЧУЗИ) (Beley et al., 1995; Pazuukhov et al., 2012). Для дальнейшего продолжения исследований ПИВ в 2015 г. была спроектирована и установлена в Антарктиде новая система двухпозиционного когерентного ВЧ зондирования ионосферы. ВЧ передатчик, работающий в частотном диапазоне (f_w) от 2 до 10 МГц, размещен на УАС, а приемная антенная система развернута на американской антарктической станции «Палмер». Протяженность радиотрасы между ними составила примерно 53 км. В настоящей работе вариации параметров пробного ВЧ сигнала, отраженного от ионосферы на такой квазивертикальной радиолинии, были использованы для оценки характеристик ПИВ, которые в дальнейшем сопоставлялись с результатами диагностики этих же процессов, полученными по данным многопозиционных синхронных измерений вариаций ПЭС.

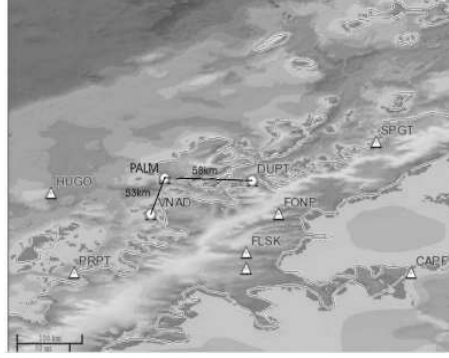


Рис. 1. Расположение станций ГНСС в регионе Антарктического полуострова (<http://sopac.ucsd.edu/map.shtml>).

2. Методы и инструменты исследований

GPS измерения ПЭС

В настоящей работе использовались данные четырех перманентных GPS станций: «Palmer» (PALM, 64.78°S, 64.05°W), «Vernadsky» (VNAD, 65.25°S, 64.25°W), «Duthiers Point» (DUPT 64.81°S, 62.82°W) и «Prospect Point» (PRPT 66.01°S, 65.34°W). Параметры перемещающихся ионосферных возмущений, а именно скорость и направление движения, оценивались с помощью «динамического подхода» к решению задачи ГНСС диагностики ПИВ, предложенного в работе Galushko et al. (2016). Методика определения характеристик возмущений основана на использовании пространственных и временных производных вариаций ПЭС $I(x, y, t)$, рассчитанных в подионосферной точке с изменяющимися во времени горизонтальными координатами $x_p(t)$, $y_p(t)$. Для модельного представления возмущения ПЭС, которое движется «замороженным» образом и имеет плоский амплитудный фронт, уравнение для $I(x, y, t)$ может быть представлено в следующем виде:

$$I(x, y, t) = I(x \sin \alpha + y \cos \alpha - V).$$

Направление распространения возмущения α (азимут) и его скорость V могут быть найдены по формулам:

$$\sin \alpha(t) = \gamma_x(t) / \gamma(t) \text{ and } \cos \alpha(t) = \gamma_y(t) / \gamma(t),$$

$$V(t) = \frac{1}{\gamma(t)} \left[\gamma_x(t) \frac{dx_p(t)}{dt} + \gamma_y(t) \frac{dy_p(t)}{dt} - I'(t) \right], \quad (1)$$

$$\gamma(t) = \pm \sqrt{\gamma_x^2(t) + \gamma_y^2(t)},$$

где пространственные γ_x , γ_y и временные I' градиенты могут быть численно оценены с помощью следующих соотношений:

$$I'_1(t_n) \approx \frac{I_1(t_n) - I_1(t_{n-1})}{\Delta t},$$

$$\gamma_x(t_n) \approx \frac{y_3 \cdot (I_2(t_n) - I_1(t_n)) - y_2 \cdot (I_3(t_n) - I_1(t_n))}{x_2 y_3 - x_3 y_2},$$

$$\gamma_y(t_n) \approx \frac{x_2 \cdot (I_3(t_n) - I_1(t_n)) - x_3 \cdot (I_2(t_n) - I_1(t_n))}{x_2 y_3 - x_3 y_2}.$$

Здесь индексы 1, 2, 3 соответствуют трем разнесенным пунктам приема сигналов ГНСС.

Доплеровские ВЧ измерения

Система, используемая для двухпозиционного когерентного ВЧ зондирования ионосферы, была установлена в мае 2015 г. и включает в себя зондирующий ВЧ передатчик, размещенный на УАС, и два когерентных приемника, расположенных на станциях «Академик Вернадский» и «Палмер». Контрольная квазивертикальная радиолиния имеет почти меридиональную ориентацию (азимут $\sim 10^\circ$). Передатчик разработан на базе коммерческого трансивера «ICOM-718». На рис. 2а показана передающая система с антенным согласующим устройством, блоком питания и модулятором. Установка имеет компьютерное управление, позволяющее оперативно задавать частоту и длительность излучения. Передающая полуволновая дипольная антенна смонтирована на вершине основного корпуса станции (рис. 2б).

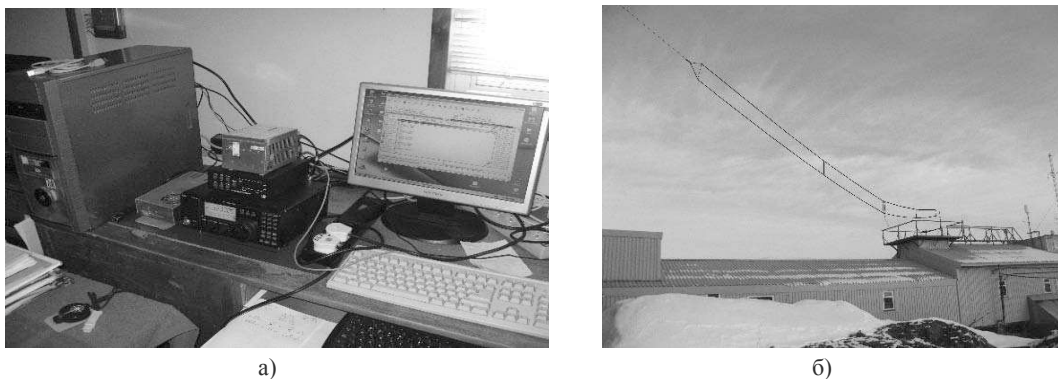


Рис. 2. Передающая система (а) и полуволновая дипольная антенна на станции «Академик Вернадский» (б).

Приемная рамочная антенна на УАС установлена на крыше «ОНЧ домика» в 400 метрах от передатчика (рис. 3). Подобные активные рамочные антенны развернуты и на станции «Палмер».



Рис. 3. Приемная рамочная антенна на «ОНЧ домике» УАС.

Приемная система на станции «Палмер» представляет собой сеть из трех когерентных приемников (рис. 4). Применение метода разностно-фазовой пеленгации с доплеровской фильтрацией позволяет одновременно оценивать вариации углов прихода и доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ) пробного сигнала.

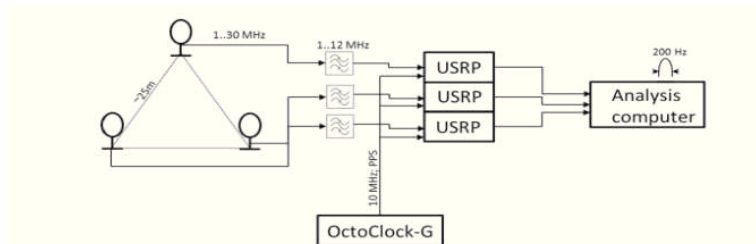


Рис. 4. Блок схема приемной системы, установленной на станции «Палмер»

Программно-управляемые радиоприемники (USRP-210) синхронизируются от внешнего опорного генератора 10 МГц «OctoClock-G». Аналоговый сигнал с антенно-фидерной системы через фильтр низких частот поступает на вход приемника, оцифровывается с частотой 100 МГц и передается на анализирующий компьютер, где проходит через полосовой фильтр и после децимации сохраняется на файловой системе с частотой оцифровки 200 Гц. В текущей конфигурации программное обеспечение позволяет сохранять данные с трех каналов, на каждом из которых регистрация производится на трех частотах одновременно. Полосовые фильтры (1-12 МГц) установлены на входе приемников для уменьшения влияния шума вне полосы приема и подавления внешних помех.

Программное обеспечение, используемое для обработки данных на обоих приемных пунктах, позволяет вычислять динамический спектр пробного сигнала практически в реальном времени. Одновременные наблюдения квазипериодических вариаций доплеровского сдвига частоты в двух пунктах в свою очередь дают возможность оценить временной период и кажущуюся скорость ПИВ вдоль радиолинии «УАС-Палмер».

3. Результаты наблюдений ПИВ

Анализ ВЧ данных, зарегистрированных на радиотрассе «УАС-Палмер» показал, что квазипериодические вариации ДСЧ присутствуют в течение большей части времени наблюдений. На рис. 5 показан типичный пример трехчасовой последовательности синхронных динамических спектров пробного сигнала для магнитно-спокойного периода времени 13-го ноября 2015 года, а) станция «Палмер», б) УАС.

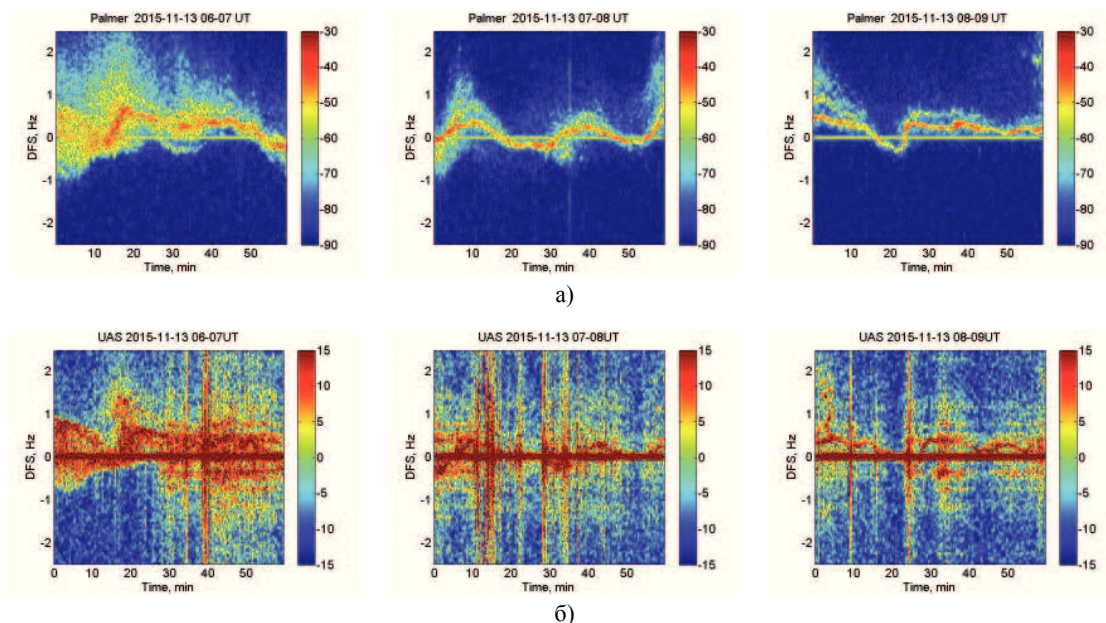


Рис. 5. Спектрограммы ВЧ сигнала ($f_w = 5,555$ МГц), принятого на станциях «Палмер» (а) и УАС (б) 2015.11.13, 6-9 УТ.

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АГВ ПО ДАННЫМ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ И КОГЕРЕНТНОГО
ВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ «ВЕРНАДСКИЙ» И «ПАЛМЕР»

На обеих панелях (рис. 5а и 5б) отчетливо видны квазипериодические вариации частоты сигнала, отраженного от ионосферы. Стабильный спектральный максимум на нулевой частоте соответствует земной волне, уровень которой на УАС естественно выше, чем на станции «Палмер». Как видно из рисунков, в течение интервала времени 7-8 UT в обоих пунктах наблюдается узкий спектральный максимум, который квазипериодически смещается с периодом приблизительно 30 мин и амплитудой порядка 0,3 Гц. Вариации ДСЧ сигнала, зарегистрированного на станциях «Палмер» и «Академик Вернадский» 2015.11.13 в 6-9 UT (рис. 6а), демонстрируют очень похожее поведение. Их взаимный корреляционный анализ позволяет оценить временную задержку вариаций ДСЧ между пунктами, которая, в свою очередь, позволяет вычислить кажущуюся скорость и пространственный масштаб АГВ/ПИВ в меридиональном направлении.

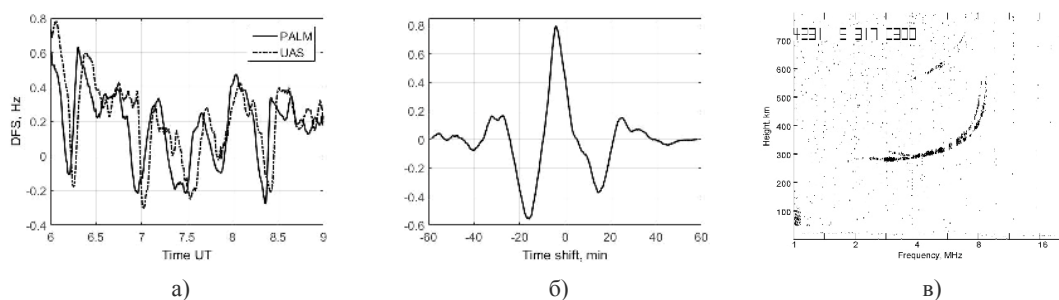


Рис. 6. (а) Временные вариации ДСЧ сигнала ($f_w = 5.555$ МГц), принятого на станциях «Палмер» и «Академик Вернадский» 2015.11.13 в 6-9 UT. (б) Взаимная корреляционная функция вариаций ДСЧ на УАС и «Палмер» в 8-9 UT. (в) Ионограмма, полученная на УАС 13.11.2015 в 7 UT (03 LT).

В данном примере временная задержка составила примерно 4 минуты. Полагая, что пробный сигнал, принятый на станции «Палмер», отразился вблизи средней точки радиотрассы, соответствующая кажущаяся скорость ПИВ вдоль направления «УАС-Палмер» составила ~ 112 м/с. Данные вертикального зондирования ионосферы, проводимого в то же самое время (рис. 6в), свидетельствуют о том, что отражение пробного сигнала произошло на высотах F2-области ионосферы. Таким образом, полученные характеристики позволяют предположить, что наблюдаемые вариации ДСЧ скорее всего были вызваны распространением среднemasштабного АГВ/ПИВ (горизонтальный размер волнового процесса в меридиональном направлении составил примерно 200 км).

В настоящей работе также были проанализированы вариации ПЭС, измеренные в пунктах, для которых траектории подионосферных точек располагались в непосредственной близости к средней точке ВЧ радиолонии. В течение рассматриваемого интервала времени 7-8 UT ближе всего к области ВЧ зондирования находились траектории подионосферных точек GPS спутников PRN03 и PRN32, которые были выбраны для дальнейшего анализа. Траектории подионосферных точек пролетов соответствующих спутников для ГНСС станции PRPT показаны на рис. 7а пунктирными линиями. Для интервала времени 7-8 UT траектории выделены жирными серыми линиями. Штриховыми линиями показаны границы областей радиусом 200 и 50 км с центром, расположенным в средней точке ВЧ радиолонии. Сглаженные детрендированные вариации ПЭС, полученные для спутников PRN03 и PRN32 на станциях PALM, DUPT и VNAD 2015.11.13 для интервала времени 6:30-8:30 UT показаны на рис. 7б и рис. 7в, соответственно.

Подобные квазипериодические вариации ПЭС с амплитудой $\sim 0,1$ TECU наблюдаются во всех трех пространственно-разнесенных пунктах для каждого спутника. Подобие и квазипериодический характер вариаций ПЭС, а также временной сдвиг между ними подтверждают наличие волнообразных возмущений. Принимая во внимание высокую корреляцию данных с разных станций, было сделано предположение о «замороженном» переносе возмущения. Детрендированные вариации ПЭС, полученные для этих трех станций, а именно DUPT, PALM и VNAD, были использованы для определения параметров движения ионосферных возмущений с помощью ранее приведенных выражений (1). Угловые гистограммы направлений распространения возмущения (азимуты), восстановленных по данным GPS спутников PRN03 и PRN32 13.11.2015 с 7 до 8 UT, показаны на рис. 8. Гистограммы совмещены с подионосферной точкой GPS спутника, наблюдавшегося на ГНСС станции VNAD в 7:30 UT. Следует отметить, что значения азимутов были рассчитаны с использованием только тех измерений ПЭС, которые удовлетворяют критерию $|\gamma| \approx |\gamma_0| \geq 15 \cdot 10^{-4}$ TECU/км, являю-

щимся необходимым условием для ограничения погрешности определения азимута ($\sigma_\alpha \leq 10^\circ$) (Galushko et al., 2016).

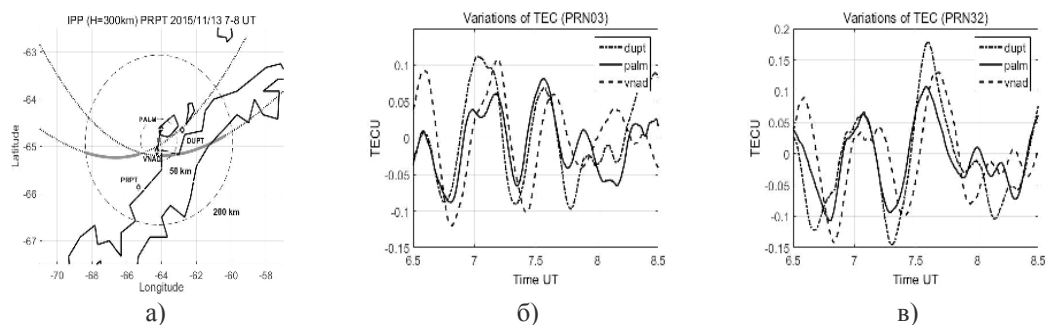


Рис. 7. а) Траектории движения подионосферных точек GPS спутников PRN03 и PRN32, наблюдаемых на станции PRPT 13.11.2015 в 7-8 UT. Координаты подионосферных точек посчитаны для модели тонкого ионосферного слоя, расположенного на высоте $H=300$ км. б, в) Вариации ПЭС, полученные для спутников PRN03 (б) и PRN32 (в) на станциях PALM, DUPT и VNAD 15.11.13 в 6:30-8:30 UT.

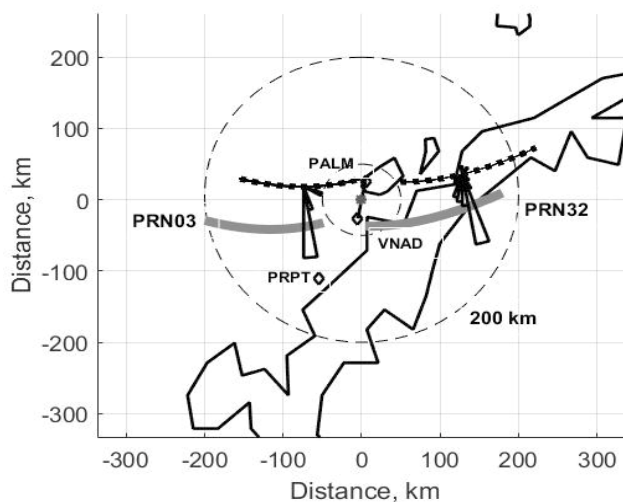


Рис. 8. Траектории движения подионосферных точек GPS спутников PRN03 и PRN32 для станций VNAD (линия с точками) и PRPT (жирная серая линия) 13.11.2015 с 7 до 8 UT и гистограммы восстановленных направлений распространения возмущения (азимуты).

Видно, что ионосферные неоднородности распространялись преимущественно в южном направлении. Наиболее вероятное направление движения возмущения имеет средний азимут около 175 и 165 градусов, а средние скорости равны примерно 98 и 100 м/с для спутников PRN03 и PRN32, соответственно (см. табл. 1). Пространственный масштаб Λ возмущения, рассчитанный с учетом полученных оценок скорости и азимута, а также положения в пространстве амплитудного фронта в течение рассматриваемого интервала времени, находится в диапазоне 180–260 км. Все оценки параметров ионосферного возмущения, полученные для обоих спутников, близки по значению и согласуются с временным периодом ($T=\Lambda/V$) и кажущейся скоростью вдоль направления «УАС-Палмер», вычисленными с помощью вариаций ДСЧ (см. табл. 1). Полученные значения характеристик соответствуют среднemasштабным АГВ/ПИВ (Hocke, 1996). Следует также отметить, что расстояние между подионосферными точками спутников PRN03 и PRN32, соответствующих одному и тому же моменту времени, составляет около 200 км (рис. 8). Учитывая сходство параметров возмущений,

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АГВ ПО ДАННЫМ ГНСС ИЗМЕРЕНИЙ И КОГЕРЕНТНОГО
ВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ НАД АНТАРКТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ «ВЕРНАДСКИЙ» И «ПАЛМЕР»

определенных для обоих спутников, можно предположить, что ширина амплитудного фронта возмущения примерно того же или большего размера.

Таблица 1.

Параметры ПИВ, полученные с использованием ГНСС (ПЭС) и ВЧ (ДСЧ) наблюдений 2015.11.13 7-8 UT. В последнем столбце приведены значения проекций длины волны и кажущейся скорости вдоль радиолинии «УАС-Палмер».

	ГНСС		ВЧ
	PRN03	PRN32	DFS
T, [мин]	27-35	32-34	~30
α	175°	165°	–
Vm, [м/с]	98	100	112
Λ , [км]	175-235	220-260	201

В рассмотренном случае движение подионосферных точек ГНСС спутников происходило практически перпендикулярно направлению распространения возмущения (рис. 8). При такой геометрии искажение вариаций ПЭС, обусловленное движением подионосферных точек (подобие доплеровского эффекта), должно быть минимальным и наблюдаемые временные флуктуации ПЭС вызваны в основном распространением ПИВ. Для дальнейшего сравнительного анализа были сопоставлены вариации ДСЧ и временной производной детрендированных вариаций ПЭС (рис. 9).

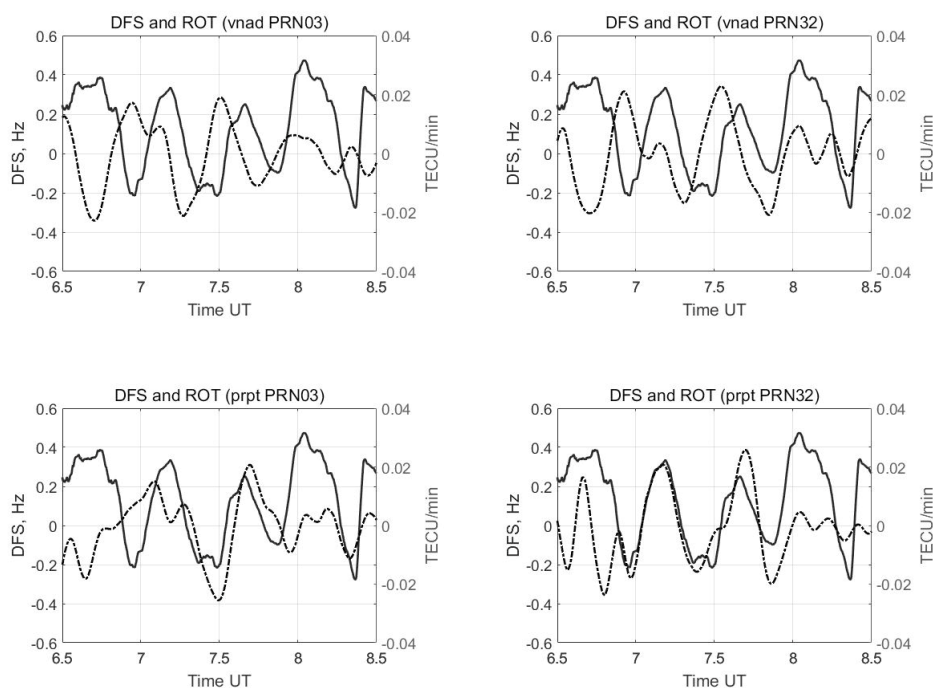


Рис. 9. Вариации ДСЧ (сплошная линия) ВЧ сигнала, принятого на станции «Палмер» 2015.11.13 в 6:30-8:30 UT и временная производная вариаций ПЭС (штрихпунктирная линия) для GPS спутников PRN03 (слева) и PRN32 (справа), полученные по данным станций VNAD (верхняя панель) и PRPT (нижняя панель).

Отметим, что периоды вариаций, зарегистрированные двумя методами в интервале с 7 до 8 UT, практически идентичны. Наблюдаемые временные сдвиги между ДСЧ и производной флуктуаций ПЭС в пространственно-разнесенных точках свидетельствуют о движении ионосферных во-

змущений с севера на юг. Временные сдвиги и соответствующие им позиции подионосферных точек были использованы для оценки параметров движения возмущения. Для расчета скорости и азимута ПИВ использовался алгоритм аналогичный методу разнесенного приема D1-GPS (метод подобных замираний), описанному в работе (Афраймович, 2006). Оценка параметров производится по временным сдвигам между подобными экстремумами вариаций в трех пунктах регистрации с учетом геометрии их расположения. В настоящей работе в качестве 2-х пунктов использовались координаты подионосферных точек спутника PRN03 (PRN32), посчитанные для станций VNAD и PRPT для времени наблюдения минимума (максимума) производной вариаций ПЭС. Третий пункт регистрации располагался в средней точке ВЧ радиотрассы. Вычисленные направления распространения (азимут) составляют примерно $\alpha=165-195^\circ$, а скорость находится в диапазоне $V=80-145$ м/с. Приведенные значения характеристик возмущения находятся в хорошем соответствии с оценками, полученными с использованием данных ГНСС измерений ПЭС и вариаций ДСЧ (табл. 1).

4. Заключение

В мае 2015 года в регионе Антарктического полуострова была установлена двухпозиционная когерентная система ВЧ зондирования ионосферы, состоящая из передатчика, расположенного на станции «Академик Вернадский», и приёмника на станции «Палмер». Система была использована для обнаружения волнообразных ионосферных возмущений, оценки их периодов и меридиональной проекции волнового вектора. Синхронно с ВЧ диагностикой проведены наблюдения ионосферных возмущений с использованием многопозиционных ГНСС измерений ПЭС. Рассмотренный в работе пример продемонстрировал, что оценки пространственных и временных параметров ионосферного возмущения, полученные двумя методами, хорошо согласуются. Проанализированное волнообразное возмущение распространялось практически в меридиональном направлении с севера на юг с азимутальным углом около 170 градусов. Временной период составлял ~30 мин, скорость и пространственный масштаб были оценены равными примерно 100 м/с и 230 км, соответственно.

Результаты данного исследования носят предварительный характер и показывают, что эффективность и точность диагностики ПИВ может быть значительно улучшена при одновременном использовании двух методов – доплеровской диагностики и радиопросвечивания региона ВЧ зондирования сигналами ГНСС. Предложенная методика в дальнейшем будет применена для систематического анализа рутинных данных мониторинга эффектов ПИВ, который непрерывно ведется в регионе Антарктического полуострова с мая 2015 года. Конечной целью таких исследований является идентификация источников возбуждения АГВ/ПИВ – тропосферной или геомагнитной природы.

***Благодарности.** Данная работа выполнена в рамках ведомственных НИР РИ НАНУ «Ятаган-3» (0116U000035), «Гелиомакс-2016» (0116U005694с) и «Шпицберген-16» (0116U002874), а также при частичной финансовой поддержке НТЦУ проекта Р667, и NSF проекта #1341557.*

Материалы исследования были получены из сервисов баз данных, предоставляемых UNAVCO при поддержке Национального Научного Фонда (NSF) и Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA) в рамках NSF соглашения о сотрудничестве No. EAR-0735156.

Литература

1. **Афраймович Э. Л.**, Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. **Зализовский А. В.**, Ямпольский Ю. М. F-рассеяние как индикатор тропосферно-ионосферного взаимодействия // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 33 – 42.
3. **Сопин А. А.**, Занимонский Е. М., Лисаченко В. Н. и др. Особенности фоновых вариаций полного электронного содержания ионосферы над Антарктическим // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 49 – 56.
4. **Ямпольский Ю. М.**, Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, № 2. – С. 130 – 152.

5. **Beley V. S., Galushko V. G., Yampolski Y. M.** Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations // *Radio Science*. – 1995. – Vol. 30, Is. 6. – P. 1739 – 1752. doi:10.1029/95RS01992.
6. **Galushko V. G., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B. et al.** Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2007. – Vol. 69. – P. 403 – 410.
7. **Galushko V. G., Paznukhov V. V., Sopin A. A. et al.** Statistics of ionospheric disturbances over the Antarctic Peninsula as derived from TEC measurements // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2016. – Vol 121. doi:10.1002/2015JA022302.
8. **Grocott A., Hosokawa K., Ishida T. et al.** Characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed near the Antarctic Peninsula by HF radar // *J. Geophys. Res. Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – P. 5830 – 5841. doi:10.1002/jgra.50515.
9. **Hoce K., Schlegel K.** A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // *Ann. Geophys.* – 1996. – Vol. 14. – P. 917 – 940. doi:10.1007/s00585-996-0917-6
10. **Paznukhov V. V., Galushko V. G., Reinisch B. W.** Digisonde observations of AGWs/TIDs with Frequency and Angular Sounding Technique // *Advances in Space Research*. – 2012. – Vol. 49, Is. 4. – P. 700-710. doi:10.1016/j.asr.2011.11.012.