

Е. М. Занимонский, Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольский, В. Н. Лисаченко,  
А. В. Пазнухов, Д. Ю. Коленов, А. А. Колосков

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

## МНОГОПОЗИЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ПРИЕМНИКОВ ГНСС

*Обоснована возможность построения региональных карт полного электронного содержания в ионосфере с пространственным разрешением 50–100 километров по данным сетей базовых станций глобальной навигационной спутниковой системы. Разработанная методика позволила обнаружить стационарные неоднородности в среднеширотной ионосфере, с пространственным масштабом около трехсот километров и временем жизни около двух часов.*

**Ключевые слова:** ионосферные неоднородности, карты, ГНСС.

### ВВЕДЕНИЕ

В ходе выполнения НИР «Лира» в РИ НАН Украины в соответствии с пунктом Технического задания «Региональная многопозиционная ГНСС-диагностика возмущений ПЭС» были исследованы и реализованы возможности восстановления вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с высоким пространственно-временным разрешением. В качестве исходных данных использованы базовые ГНСС-станции, расположенные на территории Украины и Польши.

Известно, что методы многопозиционного радиопросвечивания с использованием глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) позволяют эффективно изучать и моделировать ионосферные процессы, благодаря развитию сетей двухчастотных приемников, предназначенных в первую очередь для решения геодезических задач [6, 7, 10]. По данным мировой сети перманентных станций восстанавливаются гло-

бальные карты ПЭС ионосферы, которые широко используются в научных и прикладных исследованиях и являются наглядным примером эффективного международного сотрудничества. Эти карты дают возможность визуализировать динамические процессы в околоземной плазме в планетарном масштабе, воссоздать крупномасштабные возмущения и проанализировать регулярные суточные и сезонные изменения. Однако, их невысокое пространственно-временное разрешение [5] не позволяет изучать относительно быстрые локальные особенности поведения ионосферы в конкретном регионе земного шара, интересующем потребителей и исследователей.

К региональным процессам, масштабы которых меньше или порядка тысячи километров, относится, например, тропосферно-ионосферное взаимодействие. Локализация ионосферных возмущений связана с характерными размерами приповерхностных источников энерговыделения, таких как мощные погодные фронты, ураганы, циклоны, землетрясения, извержения вулканов и др. Обычно такие возмущения называются среднemasштабными ионосферными

© Е. М. ЗАНИМОНСКИЙ, Л. Н. ЛИТВИНЕНКО,  
Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ, В. Н. ЛИСАЧЕНКО,  
А. В. ПАЗНУХОВ, Д. Ю. КОЛЕНОВ, А. А. КОЛОСКОВ, 2015

неоднородностями, в категорию которых попадают и атмосферные гравитационные волны, являющиеся основным транспортным агентом между нейтральной нижней атмосферой и верхними ионизированными слоями.

Исследования пространственной структуры среднемасштабных неоднородностей ионосферы могут быть проведены с помощью радиотомографии с характерным горизонтальным разрешением в несколько десятков километров за время наблюдения около часа [1, 5, 14]. Томография дает обширную информацию, однако верификация полученных данных весьма затруднительна в связи с фрагментарностью таких наблюдений и сложностью обработки. Попытки сопоставить результаты томографии с распределением электронного содержания, рассчитанным, например, по яркости ночного свечения в ионосфере [1] нельзя считать убедительными. Сами авторы работы [1], как и большинство других исследователей, обращаются для апробации результатов восстановления ионосферных возмущений к глобальным картам распределения ПЭС [7, 11, 15].

Целью данного исследования являлась разработка методики мониторинга среднемасштабных ионосферных образований и волновых процессов по данным достаточно плотной региональной сети приемников ГНСС.

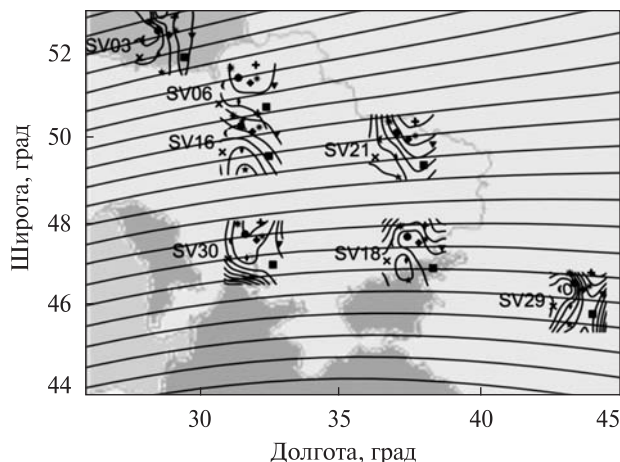
#### **МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КАРТ ПЭС И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ**

В настоящее время в странах Центральной и Северной Европы, в США и Японии, в Австралии созданы региональные и национальные сети приемных пунктов ГНСС с характерными расстояниями между ними около 50 — 70 километров. В Украине наряду с перманентными станциями международных сетей имеется несколько локальных сетей базовых станций, данные которых также могут быть использованы для многопозиционного зондирования неоднородной структуры ионосферы. В Харьковской области кластер станций NGC NET [2], состоящий из 10 приемных пунктов, дополняется станцией KHAR международной сети IGS, постоянно

действующей станцией на НЧО РИ НАНУ в с. Мартовья, аналогичная станция апробирована на РАО им. С. Я. Брауде РИ НАНУ (пос. Граково) и должна быть введена в постоянную эксплуатацию в 2015 г.

Преимущества применения для ионосферного мониторинга данных нескольких одновременно действующих приемников региональной сети ГНСС можно сформулировать следующим образом. Априорно ожидается, что вариации ионосферных параметров, полученные с нескольких станций, расположенных на расстояниях порядка десятков километров друг от друга, имеют высокую корреляцию. Использование синхронных данных большого числа станций позволяет исключить проблемы, возникающие из-за неизбежных технических перерывов в работе отдельных приемников. Стандарт флуктуаций ПЭС в каждом пункте наблюдений может являться характеристикой возмущенности ионосферы в региональном масштабе. Для проверки правильности восстановления локальных распределений ПЭС они сглаживаются во времени и сопоставляются с данными глобальных ионосферных карт, которые считаются «эталонными». Такая проверка оказывается весьма продуктивной особенно в регионах со сравнительно большой плотностью перманентных станций [11, 15].

Традиционно при построении карт ПЭС используется модель ионосферы в виде тонкого фазового экрана. Электронное содержание, вычисляемое по данным приемников ГНСС, относится к лучу зрения «спутник — приемник», который характеризуется углом места и азимутом. Для отображения ПЭС в виде географической карты текущие значения проецируются на сферическую поверхность, моделирующую ионосферу в виде тонкого слоя [3, 6, 7, 10, 11, 15]. Неоднозначность выбора радиуса такой сферической оболочки является источником неопределенности координат подионосферных точек, относительное положение которых для разных спутников и пунктов наблюдений, изменяется в зависимости от выбранной высоты слоя. Это приводит к тому, что вид локальной карты, построенной по нескольким наблюдаемым спут-



**Рис. 1.** Локальные карты (толстые изолинии) вариаций ПЭС, по данным отдельных спутников GPS, полученным на станциях под Харьковом на фоне фрагмента глобальной карты ПЭС (тонкие изолинии). Символами обозначены подионосферные точки на луче зрения «спутник — приемник»

никам, существенно зависит от выбора высоты ионосферного слоя [4].

Совершенно иная ситуация реализуется при использовании в традиционном алгоритме восстановления ПЭС данных каждого спутника по отдельности [4]. Взаимное расположение подионосферных точек сохраняется при варьировании высоты слоя, изменяется только положение центра картины и ее масштаб. Пространственные структуры, которые воспроизводятся в односпутниковой схеме, имеют практически одинаковый вид в диапазоне высот от 100 до 450 км, со сдвигом, зависящим от угла возвышения спутника над горизонтом, а вариации скорости перемещения неоднородностей в гипотезе «замороженного переноса» не превышают 20 %.

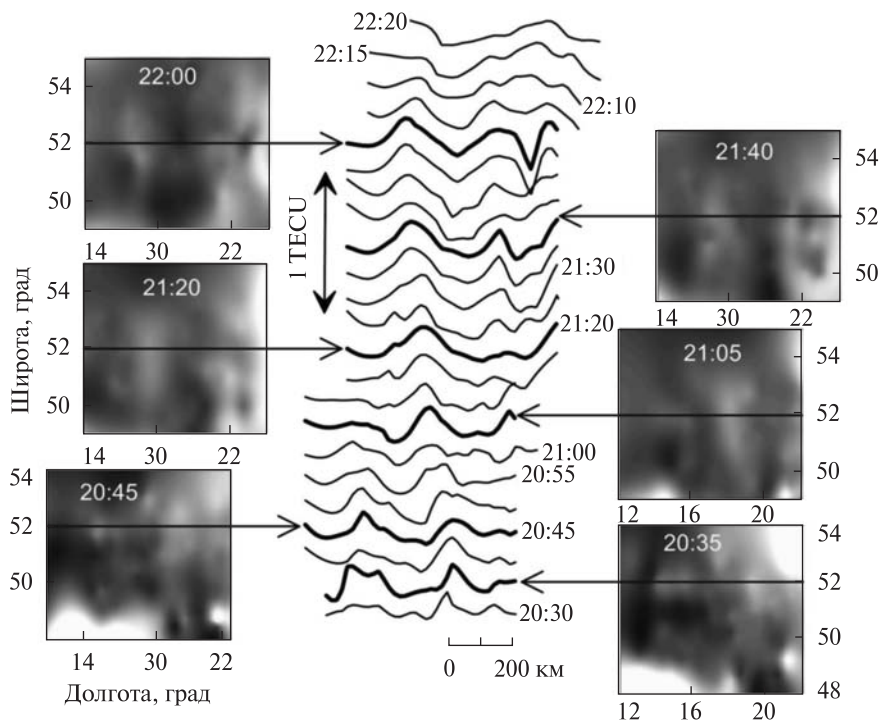
В ходе выполнения работы проводились исследования статистических характеристик ионосферных вариаций по региональным картам ПЭС, которые строились на основе данных кластера станций, расположенных вблизи Харькова по методике, описанной в работе [15]. Пример такой карты показан на рис. 1. Первичные данные с двухчастотных приемников ГНСС использовались для получения наклонной величины ПЭС в каждом направлении «спутник — приемник» для каждой эпохи наблюдений (одно-

кратного измерения кодовых псевдодальностей и фаз несущих сигналов). После пересчета ПЭС к вертикальному направлению и определения координат подионосферных точек строилась фоновая карта по данным всех наблюдаемых спутников на всех станциях кластера, аппроксимированная поверхностью второго порядка по широте и долготе. Форма изолиний этой фоновой карты в масштабе данного рисунка практически не отличается от формы соответствующих изолиний фрагмента глобальной карты. Из-за наличия в каждом приемнике неизвестных задержек сигналов на двух частотах абсолютные значения ПЭС, получаемые в результате вычислений, имеют переменную систематическую погрешность, устраняемую введением поправки, величина которой равна разности средних значений фонового электронного содержания рассчитанного и взятого из глобальной карты. Затем по данным отдельных спутников восстанавливались локальные карты отклонений ПЭС от региональной карты в кластерах подионосферных точек (рис. 1).

Локальные карты могут быть использованы для оценки статистических характеристик вариаций ПЭС, но информативность полученных характеристик невелика. Оказывается, сложно разделить пространственные и временные вариации из-за перемещения подионосферных точек со скоростями сопоставимыми со скоростью движения ионосферных неоднородностей [3].

Существенного прогресса при исследовании среднemasштабных процессов в ионосфере можно добиться, используя данные многочисленных мультисистемных (GPS+ГЛОНАСС+GALILEO) приемников ГНСС региональных и национальных сетей, подобно тому, как это описано в работах [7, 11], при определенной доработке модели ионосферы.

Погрешности карт в модели тонкого слоя появляются не только из-за неоднозначности выбора высоты слоя, но и из-за использования упрощенной проектирующей функции — математического выражения для пересчета наклонного полного электронного содержания вдоль луча зрения «спутник — приемник» в вертикальное ПЭС [13]. Нами предложено отказаться от



**Рис. 2.** Карты остатков ПЭС после удаления полиномиальных трендов по широте и долготе для шести эпох 9 ноября 2013 г. В центральной части «водопада» показаны сечения карт вдоль 52-й параллели через каждые 5 мин

модели тонкого слоя и оценивать ПЭС только в вертикальном направлении, используя данные спутников, находящихся вблизи зенита. В этом случае полное электронное содержание измеряется непосредственно над приемниками, а пространственное разрешение определяется расстоянием между ними. Существенным недостатком предлагаемой схемы получения данных для построения региональной карты ПЭС является то, что навигационные спутники над среднеширотными станциями вблизи зенита находятся только несколько часов в сутки, а для высокоширотных станций схема не работает вовсе. Отказ от модели тонкого слоя позволяет ввести интервал пространственного разрешения 50–100 км, который сопоставим с характерной толщиной ионосферного слоя [9].

Для примера рассмотрим несколько карт вариаций ПЭС, построенных по данным центрально-европейских перманентных станций ГНСС и польской национальной сети ASG-EUPOS [8],

любезно предоставленным коллегами из Варминьско-Мазурского университета в ходе выполнения совместных работ [4, 12]. Интересный случай вариаций ПЭС обнаружился при обработке данных двух спутников GPS, SV08 и SV09, которые последовательно были в зените, благодаря чему удалось построить карты для почти двухчасового интервала наблюдений. На рис. 2 показаны карты вариаций ПЭС для шести эпох вечером 9 ноября 2013 г. На картах видны чередующиеся локальные максимумы и минимумы ПЭС в целом образующие квазипериодическую структуру. В центральной части рис. 2 в режиме «водопада» показаны сечения карт вдоль 52-й параллели через каждые 5 мин. Вполне отчетливо прослеживаются вариации ПЭС с периодом около трехсот километров, живущие свыше двух часов и практически не перемещающиеся в пространстве.

Подобная картина наблюдается и в другие дни в разное время суток. В перспективе пред-

полагается построение физических ионосферных моделей формирования таких неоднородных структур. На данном этапе исследований основное внимание было уделено разработке самой методики восстановления региональных карт вариаций ПЭС с высоким пространственно — временным разрешением и усовершенствованию программных средств для автоматизации обработки больших массивов исходных данных, а также оценкам методических погрешностей, неизбежно возникающих в связи с упрощенным моделированием ионосферы.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе выполнения НИР «Ли́ра» в 2014 г. предложена и апробирована возможность построения карт ПЭС ионосферы с пространственным разрешением 50—100 километров по данным региональных сетей базовых станций ГНСС. Применение разработанной методики позволило обнаружить наличие долгоживущих неоднородностей в среднеширотной ионосфере, с пространственным масштабом около трехсот километров и временем жизни от одного до трех часов. В перспективе описанная методика может быть применена для сопоставления с данными бортовых спутниковых ионосферных наблюдений среднemasштабных плазменных неоднородностей.

Восстановление региональных карт ПЭС может быть также полезно для коррекции радиоастрономических наблюдений в декаметровом диапазоне волн проводимых в Радиоастрономическом институте НАН Украины на радиотелескопах УТР-2, ГУРТ и системы УРАН, а также создаваемых в Европе телескопов LOFAR [4].

*Работа выполнена в 2014 г. в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям в соответствии с Техническим заданием НИР «Многопозиционные ионосферные исследования для подспутникового сопровождения национальных и международных космических проектов», шифр «Ли́ра-2», № Государственной регистрации 0114U002822.*

*Авторы благодарят руководство и сотрудников Навигационно-геодезического Центра в Харькове за предоставление ГНСС данных сети NGC NET.*

1. Андреева Е. С., Калашиникова С. А., Куницын В. Е., Нестеров И. А. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии // Соврем. пробл. дистан. зонд. Земли из космоса. — 2013. — **10**, № 1. — С. 103—111.
2. Балан А. Ю., Горб А. И., Ефременко П. Е., Нестерович А. Г. Преимущества использования сети GPS-базовых станций в Харьковской области. — Интернет ресурс <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=1233>
3. Галушко В. Г., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Суточные вариации параметров ионосферных неоднородностей по данным измерений ПЭС над Антарктическим полуостровом // Радиофиз. и радиоастрон. — 2012. — **17**, № 3. — С. 218—233.
4. Занимонский Е. М., Горб А. И., Лисаченко В. Н. и др. Возможности и проблемы использования локальных ионосферных карт по данным ГНСС // 5-й Междунар. радиоэлектронный форум МРФ-2014: Сб. науч. тр. — Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2014. — Т. 1. — С. 199—201.
5. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С., Нестеров И. А. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // Успехи физ. наук. — 2010. — **180**, № 5. — С. 548—553.
6. Янків-Вітківська Л. М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій західної України // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 47—52.
7. Bergeot N., Chevalier J-M., Bruyninx C., et al. Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data // J. Space Weather Space Clim. — 2014. — **4**. —A31.
8. Borys J., Oruba A., Graszka W., et al. ASG-EUPOS densification of EUREF permanent network on the territory of Poland // Repts Geod. — 2008. — **2**, N 85. — P. 105—112.
9. Fox M. W., Mendillo M., Klobuchar J. A. Ionospheric equivalent slab thickness and its modeling applications // Radio Sci. — 1991. — **26**. — P. 429—438.
10. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. — 2009. — **83**. — P. 263—275. — doi 10.1007/s00190-008-0266-1.
11. Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Gosciwski D., Pazjowski J. Validation of approximation techniques for local TEC mapping // Acta Geodyn. Geomater. — 2013. — **10**, N 3 (171). — P. 275—283.
12. Krypiak-Gregorczyk A., Zanimonskiy Y. M., Sopin A. A., et al. Accuracy analysis of local TEC maps derived using limited number of GNSS stations // EUREF 2014 Symp.: Abstracts book. — Vilnius, Lithuania, 2014. — P. 23.
13. Smith D. A., Araujo-Pradere E. A., Minter C., Fuller-Rowell T. A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the

- ionosphere // Radio Sci. — 2008. — 43. — RS6008. — doi:10.1029/2007RS003769.
14. Stoll C., Schluter S., Heise S., et al. A GPS based three-dimensional ionospheric imaging tool: Process and assessment // Adv. Space Res. — 2006. — 38, N 11. — P. 2313—2317.
15. Wielgosz P., Kashani I., Grejner-Brzezinska D., et al. Regional ionosphere modeling using smoothed pseudorange // 5th Internat. Antarctic Geodesy Symp. (AGS'03), Lviv, Ukraine, 15—17 Sept. 2003. — Cambridge, 2005. — SCAR Report N 23. — P. 37—41.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2014

Є. М. Занімонський, Л. М. Литвиненко,  
Ю. М. Ямпольський, В. М. Лісаченко,  
О. В. Пазнухов, Д. Ю. Коленов, А. О. Колосков

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

#### БАГАТОПОЗИЦІЙНА ДІАГНОСТИКА СЕРЕДНЬШИРОТНОЇ ІОНОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ПРИЙМАЧІВ ГНСС

Обґрунтовано можливість побудови регіональних карт ПЕВ іоносфери з просторовим розділенням 50—100 кі-

лометрів за даними мережі базових станцій ГНСС. Методика, яка була розроблена, дала можливість виявити наявність стаціонарних неоднорідностей в середньширотній іоносфері, з просторовим масштабом близько трьохсот кілометрів та часом життя близько двох годин.

**Ключові слова:** іоносферні неоднорідності, карти, ГНСС.

Ye. M. Zanimonskiy, L. M. Lytvynenko,  
Yu. M. Yampolski, V. N. Lisachenko,  
A. V. Paznukhov, D. Yu. Kolenov, A. A. Koloskov

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

#### THE MULTIPOSITION DIAGNOSTICS OF MIDLATITUDE IONOSPHERE USING THE DATA OF REGIONAL NETWORK OF GNSS RECEIVERS

The possibility of constructing regional maps of the ionosphere TEC with a spatial resolution of 50—100 kilometers according to the GNSS network base stations is justified. The developed technique allowed detecting the presence of stationary irregularities in the mid-latitude ionosphere, with a spatial scale of about three hundred kilometers and time of existence about two hours.

**Key words:** ionospheric irregularities, maps, GNSS.