УДК 528:629.783

А. А. Жалило¹, А. И. Емец¹, Е. А. Бессонов², И. В. Дицкий², Е. М. Занимонский³

1 Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины

³ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЧАСТОТНЫХ ФАЗОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СЕТЯХ ПЕРМАНЕНТНЫХ ГНСС-СТАНЦИЙ

Изложены результаты построения, оптимизации и валидации региональной двумерной модели полного электронного содержания ионосферы. Моделирование основывается на использовании высокоточных однозначных фазовых «безгеометрических» ГНСС-наблюдений в сети перманентных референцных станций и осуществлении совместного МНК-оценивания параметров модели и неизвестных фазовых смещений. Показано, что предложенная модель позволяет на 65...80 % точнее выполнить абсолютное и дифференциальное позиционирование по сравнению с известной моделью GIM IONEX IGS.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), перманентная референцная станция, наблюдения, моделирование, полное электронное содержание ионосферы.

введение

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012—2016 гг. в обеспечение выполнения международного проекта «Ионосат-Микро» [4]. Результаты были получены в 2013—2014 гг. сотрудниками ГАО НАН Украины и Харьковского национального университета радиоэлектроники МОН Украины при выполнении двух этапов НИР [5, 6].

Центральной задачей указанного проекта является изучение динамических процессов в ионосфере контактными методами. Также предусматривается использование двухчастотного

© А. А. ЖАЛИЛО, А. И. ЕМЕЦ, Е. А. БЕССОНОВ,

многосистемного приемника ГНСС в составе комплекса научной аппаратуры «Ионосат-Микро» на платформе низкоорбитального космического аппарата «Микросат» [4]. Принимаемые сигналы навигационных спутников ГНСС, проходящие через ионосферу, несут информацию о полном электронном содержании вдоль траекторий распространения сигналов. Решение обратной задачи позволяет построить модель вертикального профиля электронной концентрации ионосферы [4]. Для калибровки результатов будет необходимо использовать данные о распределении полного электронного содержания (ПЭС) в вертикальном направлении в том регионе, над которым определялись ионосферные профили.

В настоящей работе изложены основные результаты создания региональной двумерной (2D) модели ПЭС с высоким пространствен-

И. В. ДИЦКИЙ, Е. М. ЗАНИМОНСКИЙ, 2015

но-временным разрешением по результатам высокоточных фазовых т. н. «безгеометрических» GF [1, 21] ГНСС-наблюдений и ее валидация в относительно «густой» сети перманентных референцных станций Украины с межбазовыми расстояниями 100-150 км. Эта задача отвечает таким направлениям проекта «Ионосат-Микро», как мониторинг динамики ионосферы на различных временных и пространственных масштабах, создание и пополнение базы данных возмущённой ионосферы, интеграция данных в геоинформационные системы и др. [2]. Также ставилась задача создать региональную модель ПЭС с более высокой точностью компенсации влияния ионосферных задержек сигналов ГНСС (по сравнению с известными ионосферными моделями Klobuchar, grid-моделями GIM IONEX, SBAS и др. [1, 8, 15, 21]) для навигационных определений и точного позиционирования на территории Украины [2].

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

При моделировании ПЭС ионосферы мы будем использовать известное представление распределения электронного содержания в виде «тонкого слоя», который находится в интервале высот 300...450 км (высота «тонкого слоя» выбирается априори либо оценивается) [16, 21]. Моделирование распределения ПЭС выполнялось для региональной области пространства (сектор сферы — «шапка»), размер которой выбирался исходя из конфигурации сети ГНСС-станций Украины. Параметрами модели являлись текущие координаты т. н. «подыоносферных» точек, которые определяются по точкам прокола «тонкого слоя» ионосферы лучами «спутники ГНСС — наземные приемники». Для моделирования регионального пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы использовано известное представление разложения ПЭС по сферическим функциям [21].

Традиционно для построения модели ПЭС ионосферы используют кодовые GF-наблюдения, которые, в отличие от фазовых наблюдений, являются однозначными. Межчастотные аппаратные кодовые задержки спутников и приемников [21] учитываются с использованием оценок центров обработки IGS (International GNSS Service). Использование наблюдений станций только сети IGS накладывает существенное ограничение и не позволяет увеличить состав рабочей сети для повышения точности моделирования в противном случае необходимо дополнительно оценивать параметры аппаратных задержек в приемниках, не входящих в состав сети IGS. Уровень погрешностей из-за многолучевости и шумов кодовых наблюдений уменьшают путем сглаживания кодовых наблюдений с использованием фазовых. Однако погрешности сглаживания (эта процедура известна также под названием «leveling») могут достигать нескольких дециметров, что также ограничивает точность моделирования ПЭС.

Использование только фазовых GF-наблюдений позволяет исключить указанные недостатки кодовых наблюдений. Но в этом случае, как и при традиционном подходе, параметры ионосферной модели требуется совместно оценивать с мешающими параметрами — неизвестными фазовыми константами [7, 21]. В этом состоит одна из проблем моделирования ПЭС ионосферы по наблюдениям наземных станций. Совместное оценивание информационных и неинформационных параметров, как известно, влияет на точность определения информационных параметров, в данном случае — параметров ионосферной модели. Для ослабления или же исключения этого эффекта исследователями рассматривались различные подходы. Так, в работе [11] было предложено оценивать более точно задержки сигналов в аппаратуре ГНСС-спутников по наблюдениям бортовых ГНСС-приемников низкоорбитальных космических аппаратов, движущихся на высотах свыше 800 км, т. е. выше эффективного слоя ионосферы. Это позволило в значительной мере разделить, т. е. оценить раздельно аппаратурные задержки и параметры распределения ПЭС.

В нашей работе для точной совместной оценки указанных информационных (параметры модели ПЭС) и «мешающих» параметров предложен иной подход — использовать однозначные дифференциальные фазовые GF-наблюдения относительно «густых» сетей наземных перманентных референцных ГНСС-станций. Обязательным условием реализации такого подхода является выполнение разрешения фазовой неоднозначности (РФН) на всех базовых линиях сети станций. Это позволяет существенно уменьшить число неизвестных параметров и обеспечивает, как показали экспериментальные исследования, достижение существенного повышения точности совместного МНК-оценивания всех неизвестных параметров, включая параметры модели ПЭС. В свою очередь это обеспечивает повышение точности компенсации ионосферных задержек при навигации и позиционировании по сигналам ГНСС по сравнению с использованием известных ионосферных моделей ПЭС, таких как модель Klobuchar [15] и GIM IONEX IGS [21].

Для достижения поставленной цели научного проекта — построения региональной модели ПЭС по фазовым ГНСС-наблюдениям — реализован следующий подход, включающий несколько этапов [2, 5, 6].

На первом этапе выполнен полный цикл обработки наблюдений выбранной сети станций на заданных сутках, включая:

• предварительную обработку и редактирование наблюдений («пре-процессинг») задействованных в эксперименте станций и отбраковку по выбранным критериям контроля качества непригодных к дальнейшей обработке групп наблюдений;

• побазового разрешения фазовой неоднозначности наблюдений обеих частот и верификации его результатов;

• формирования линейных комбинаций («нулевых», одинарных и двойных разностей) «безгеометрических» ионосферных GF-комбинаций [1, 21] на избранных базовых линиях и их фильтрации/сглаживания (ниже кратко описаны указанные GF-комбинации).

При условии выполнения разрешения неоднозначности двойных разностей фазовых наблюдений GF-комбинации зависят только от ионосферных задержек на трассах «станции — спутники». Одинарные разности ионосферных задержек (разности на трассах «станции — спутники») известны с точностью до неизвестных смещений, постоянных на интервале наблюдений, которые вместе с информационными параметрами аппроксимирующей ПЭС-модели включаются в вектор оцениваемых параметров.

На втором этапе выполняются:

• выбор аппроксимирующей ПЭС-модели, ее предполагаемых параметров, построение 2D-модели ПЭС с использованием оценок GF-наблюдений; для моделирования была использована модель «тонкого слоя» и представление ПЭС в виде разложения по сферическим функциям;

• совместная МНК-оценка информационных параметров (в данном случае параметров региональной модели ПЭС) и «мешающих» параметров, т. е. решение обратной задачи восстановления распределения ПЭС ионосферы по пространству и во времени с использованием высокоточных фазовых наблюдений;

• оптимизация параметров модели — минимального интервала «замороженности» ПЭС, на котором параметры модели принимаются постоянными, а также степени и порядка пространственного аппроксимирующего полинома.

В ходе выполнения проекта был выполнен сравнительный анализ зарубежных и отечественных источников по моделированию и мониторингу ПЭС ионосферы [7, 12—16, 18, 19, 21, 22] и отобраны варианты региональных математических моделей. Так, для моделирования ПЭС была использована апробированная модель «Spherical Cap Harmonic Model» [18, 19], которая относительно проста и эффективна в реализации и, как представляется авторам, наилучшим образом подходит для решения поставленной задачи.

На третьем этапе выполняется валидация полученной реализации модели, в процессе которой оценивается апостериорная точность восстановления пространственно-временного распределения ПЭС и осуществляется сравнение полученных результатов моделирования ионосферных задержек сигналов с аналогичными результатами, полученными с использованием

1 ALCI НИИ ГК, ЕРN Алчевск, Луганская обл. 2 BERY System.NET Берислав, Одеоская обл. 3 BFRZ System.NET Бобринец, Кировская обл. 4 BOBR System.NET Бобринец, Кировская обл. 5 CHUG NGCNET Чутеч, Карьковская обл. 6 CNIV System.NET, EPN Черноны 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Черноны 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Донецк 9 DNRS CKH3Y Евпатория, Крам 11 EVRS CKH3Y Вапатория, Крам 12 GLSN System.NET Гюбино, Полтавская обл. 13 GLBN System.NET Гюбино, Полтавская обл. 14 IZRS CKH3Y Чавачи, Одеоская обл. 15 IZUM NGCNET Измач., Одеоская обл. 16 FDRS CKH3Y Феодоская, Карьковская обл. 17 KHAR ГАО HAHY, IGS/EPN Карьков 18 KIRV	№	Условное наименование станции	Принадлежность станции (сеть/организация)	Населенный пункт
2 BERY System.NET Берислав, Доронская обл. 3 BERZ System.NET Бобрислав, Долесская обл. 4 BOBR System.NET Бобрислав, Долесская обл. 5 CHUG NGCNET Чутуек, ХарьКоская обл. 6 CNIV System.NET, EPN Черновция 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Черновция 9 DNRS CKH3Y Дунаевция, Херым 10 EVPA FAO HAHY, EPN Евпатория, Крым 11 EVRS CKH3Y Виланицая обл. 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Кнев 13 GLBN System.NET Гобнию, Полтавская обл. 14 IZRS CKH3Y Изманл, Доссокая обл. 15 IZUM NGCNET Изманл, Доссокая обл. 16 FDRS CKH3Y Феолосия, Крымо 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоградская обл. 20 KPSK NGCNET Лозовая, Дарьковская обл. 21	1	ALCI	НИИ ГК. EPN	Алчевск. Луганская обл.
3 BERZ System.NET Bergesonka, Onceckas ofs 4 BOBR System.NET Eofopineu, Kupnoorpaackas ofs 5 CHUG NGCNET Hyryes, Xapakobeckas ofs 6 CNIV System.NET, EPN Hephartos 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Hephartos 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Joneux 9 DNRS CKH3Y Emaropus, Kpain 11 EVRS CCH3Y Emaropus, Kpain 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Kice 13 GLBN System.NET Trofinth, Grontackas ofs 14 IZRS CKH3Y Mawan, Onceckas ofs 15 IZUM NGCNET Hawan, Onceckas ofs 16 FDRS CKH3Y Conceus, Kpain 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Kuposorpaackas ofs 19 KORP FAO HAHY Kopon, Hepintrosckas ofs 20 KPSK NGCNET Kymstoskas ofs 21 KRG <td>2</td> <td>BERY</td> <td>System.NET</td> <td>Берислав. Херсонская обл.</td>	2	BERY	System.NET	Берислав. Херсонская обл.
4 BOBR System.NET Бобринец, Кировоградская обл. 3 CHUG NGCNET Чутуев, Харьковская обл. 6 CNIV System.NET, EPN Черновида 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Черновида 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Доненк 9 DNRS CKH3Y Дунаевцы, Хмельницкая обл. 10 EVPA FAO HAHY, EPN Евпатория, Крым 11 EVRS CKH3Y Волно, Крым 12 GLSV FAO HAHY, ICS/EPN Kree 13 GLBN System.NET Drofnen, Полтавская обл. 14 IZRS CKH3Y Физанл, Дарсковская обл. 15 IZUM NGCNET Изюм, Харьковская обл. 16 FDRS CKH3Y Фезаосни, Крым 17 KHAR FAO HAHY, ICS/EPN Харьковская обл. 19 KORP FAO HAHY, ICS/EPN Кариковская обл. 20 KPKK NGCNET Кульковская обл. 21 KRRG <t< td=""><td>3</td><td>BERZ</td><td>System NET</td><td>Березовка Олесская обл</td></t<>	3	BERZ	System NET	Березовка Олесская обл
5 CHUG NGCNET Чутуев, Харьковская обл. 5 CHUG NGCNET Чутуев, Харьковская обл. 6 CNIV System.NET, EPN Чернитов 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Черновиья 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Доненк 9 DNRS CKH3Y Дунаения, Хмельницкая обл. 10 EVPA FAO HAHY, EPN Евпатория, Крым 11 EVRS CKH3Y Измаил, Олесская обл. 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Касв 13 GLBN System.NET Dio6into, Половар, Харьковская обл. 14 IZRS CKH3Y Феодосия, Крым 15 IZUM NGCNET Изон, Харьковская обл. 16 FDRS CKH3Y Феодосия, Крым 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоградская обл. 20 KPSK NGCNET Кулиянск, Харьковская обл. 21 KRG TNT-TPI GNSS Network Крымой Род, Диепропетеровская обл. 22<	4	BOBR	System NFT	Бобринец Кировоградская обл
5 CHOG Nytern NET, EPN Чернятов 6 CNIV System NET, EPN Чернятов 7 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Чернятов 9 DNCK TNT-TPI GNSS Network Доненык 9 DNRS CKH3Y Дунаелцы, Акмельницкая обл. 10 EVPA FAO HAHY, EPN Евпатория, Крым 11 EVRS CKH3Y Евпатория, Крым 12 GLSV FAO HAHY, ICS/EPN Киев 13 GLBN System.NET Drobino, Полтавская обл. 14 IZRS CKH3Y Феодосия, Крым 15 IZUM NGCNET Измаи, Одлесская обл. 16 FDRS CKH3Y Феодосия, Крым 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Харьковская обл. 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоград, Кировоградская обл. 19 KORP FAO HAHY, IGS/EPN Кацивели, Крым 20 KPSK NGCNET Тулакока обл. 21 KRRG	5	CHUG	NGCNET	Читурь Харькорская обл
0 CRNI ZAKPOS/UA-EUPOS Черновицы 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Донецик 9 DNRS CKH3Y Динецик 10 EVPA FAO HAHY, EPN Евпатория, Крым 11 EVRS CKH3Y Евпатория, Крым 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Кнев 13 GLBN System.NET Елобино, Поттавская обл. 14 IZKS CKH3Y Измаил, Оаесская обл. 15 IZUM NGCNET Изом, Харьковская обл. 16 FDRS CKH3Y Фезаосцая, Крым 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Харьков 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоградская обл. 19 KORP FAO HAHY, IGS/EPN Карьков 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Киривоград, Кировоградская обл. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Кацивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лоотавская обл. 24 LBRS CKH3Y Лутанск 25 LGRS CKH3Y Лутанск 26 LUBR SystemNET Матин, Житомирская обл.	6	CNIV	System NET EPN	Чернигор
Image: Second Structure Image: Second Structure Image: Second Structure 8 DNCK TNT-TPI GNSS Network Joheuk 9 DNRS CKH33 Junaeniuk, Xuenshninkan ofn. 10 EVPA FAO HAHY, EPN Ennaropins, Kpism 11 EVRS CKH33 Ennaropins, Kpism 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Kies 13 GLBN System.NET Drofouno, Tornasexas ofn. 14 IZRS CKH33 Waman, Oaecckas ofn. 15 IZUM NGCNET Maion, Xapikoosckas ofn. 16 FDRS CKH33 Woon, Rupoborpaa, Kupoborpaa, Ckas ofn. 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Kapikoos 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Kupoborpaa, Kupoborpaa, Ckas ofn. 20 KPSK NGCNET Kopoon, Черниговская ofn. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Kupoborpaa, Kupoborpaa, Kapikoockas ofn. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Kautusenu, Kpiam 23 LOZV NGCNET	7	CRNI	ZAKPOS/IIA EUPOS	Цериории
b DNCK INTERTORS ADMANA ADMANA 9 DNRS CKH33 ADMANA ADMANA ADMANA 10 EVPA FAO HAHY, EPN Entaropina, Kpain 11 EVRS CKH33 Entaropina, Kpain 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Kitea 13 GLBN System.NET Enofunio, IoritaBckaa ofo. 14 IZKS CKH33 Mismatur, Oaccekaa ofo. 15 IZUM NGCNET Hison, Xapakonekaa ofo. 16 FDRS CKH33 Феодосия, Kpain 17 KHAR FAO HAHY Kopoon-quar, Kipoborpaackaa ofo. 19 KORP FAO HAHY Kopoon, "Lephitrobeckaa ofo. 19 KORP FAO HAHY Kopoon-quar, Kipoborpaackaa ofo. 20 KPSK NGCNET Kupoon-quar, Kipoborpaackaa ofo. 21 KRGG TNT-PTI GNSS Network Kpineok Por, Amenporepackaa ofo. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Kaumeani, Kpain 23 LOZV NGCNET <td>8</td> <td>DNCK</td> <td>TNT TPI GNSS Network</td> <td>Поцеци</td>	8	DNCK	TNT TPI GNSS Network	Поцеци
j DNR.5 CR1DJ DNR.5 DNR.5 DR.6 10 EVPA FAO HAHY, EPN EBnaropus, Kpim 11 EVRS CKH3Y EBnaropus, Kpim 12 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Knes 13 GLBN System.NET Endonus, Oncercas offi. 14 IZRS CKH3Y Makuu, Onceccas offi. 15 IZUM NGCNET H3ow, Xapakoockas offi. 16 FDRS CKH3Y Фолосия, Kpim 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Xapakos 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Kupoborpag, Ku	0	DNRS	CKH3V	Диноцк Луцорации Умели ниниса обл
ID LVTA IAN IATT, LTA Landropa, Kpam I1 EVRA CKH33 Enaropa, Kpam I2 GLSV FAO HAHY, IGS/EPN Kres I3 GLBN System.NET Drofmin, Rpam I4 IZRS CKH33 Waman, Onceckan ofn. I4 IZRS CKH33 Peonocus, Kpam I6 FDRS CKH33 Peonocus, Kpam I7 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Xaptorecas, Kupoborga, Ku	10			Дунасыцы, Амельницкая обл.
11 EVNS CK133 Enablity (GS) (EN13) 12 GLSV FAO HAHY, (GS) (EPN Kires 13 GLBN System.NET Drofthion, Полтавская обл. 14 IZRS CKH33 Изманл, Олесская обл. 15 IZUM NGCNET Измон, Харьковская обл. 16 FDRS CKH33 Феолосия, Крым 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Харьков 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоградская обл. 19 KORP FAO HAHY Kopon (epintrosckas ofn. 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Купянск, Харьковская обл. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Kalunsenu, Kpim 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH33 Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH33 Лутанск 26 LUBR SystemNET Малин, Житомирская обл. 27 MAGD SystemNET Малин, Черниговская обл. 28 MALN SystemNET Николаев 30 NIZH SystemNET Николаев 32 NKRS	10		IAO IANJ, EFN	Евнатория, Крым
12 OLSV FAO FARTS, IOS/EPN Ketta 13 GLBN System.NET Ino6HHO, IIOTTABCKAB oбл. 14 IZRS CKH3Y Mamaun, Onceckan oбл. 15 IZUM NGCNET H310M, Xaptskobeckan oбл. 16 FDRS CKH3Y Φeogocia, Kpism 17 KHAR FAO HAHY, IOS/EPN Xaptskobeckan oбл. 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Kupoborpan, Kupoborpan, Kupoborpan, Kapako ofn. 19 KORP FAO HAHY Kopon, Чернитовская ofn. 20 KPSK NGCNET Kymaok ofn. 21 KRG TNT-TPI GNSS Network Kpuborpan, Kupobockan ofn. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Katumenu, Kpism 23 LOZV NGCNET Jostan, Kapism 24 LBRS CKH3Y Jyfensi, Inortabckan ofn. 25 LGRS CKH3Y Jyrahck 26 LUBR System.NET Maranihokan, Altenponerp. ofn. 27 MAGD System.NET Maranihokan, Altenponerp. ofn. 28 MALN System.NET Haranihokan, Altenponerpobckan ofn. 29 MIKL HJI IFK, IGS/EPN Hukonaze 30 NIZH System.NET Haranihokan, Al	11		CARDY FAO HALLY LOS/EDN	Евнатория, крым
13 OLDN System.NE1 Π/ΟθΠΦ, Π/OTRBERRAR 00Л. 14 IZRS CKH3Y Μακαιπ, OLDTBERRAR 00Л. 15 IZUM NGCNET Изом, Харьковская обл. 16 FDRS CKH3Y Феодосия, Крым 17 KHAR ΓΑΟ HAHY, IGS/EPN Харьков 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоград, Карьковская обл. 19 KORP ГАО HAHY Короп, Черниговская обл. 20 KPSK NGCNET Кулянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривой Рог, Днепропетровская обл. 22 KTVL ГАО HAHY, EPN Кацивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 29 MIKL HJI K, IGS/EPN Николаев 30 NIZH SystemNET Наколаев 32 NKPL SystemNET Наколаев 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская	12	GLSV	IAU HAHY, IGS/EPN	
14 LZNS СКНЗУ РИЗМИЛ, Одесская обл. 15 IZUM NGCNET Изюм, Харьковская обл. 16 FDRS СКНЗУ Феодосия, Крым 17 КНАR ГАО НАНУ, IGS/EPN Харьков 18 КIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоградская обл. 19 KORP ГАО НАНУ Короп, Черниговская обл. 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривооград, Кировоградская обл. 22 KTVL ГАО НАНУ, EPN Кацивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS СКНЗУ Лутанск 25 LGRS СКНЗУ Лутанск 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 27 MAGD SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Магдалиновка, Днепропетровская обл. 29 MIKL НДК, IGS/EPN Николаев 31 NKRS НПК «Європромсервіс» Николаев 32 NKPL SystemNET Полтава 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Opexoв, Запорожская обл.	13	GLBN	System. NE I	ПЛООИНО, ПОЛТАВСКАЯ ООЛ.
15 LZUM NGCNET Pistom, Appkobeckal doll. 16 FDRS CKH3Y Феодосця, Крым 17 KHAR FAO HAHY, IGS/EPN Харьков 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград, Кировоград, Ская обл. 19 KORP FAO HAHY Kopon, Черниговская обл. 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Купянск, Харьковская обл. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Katutaeni, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 27 MAGD SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Наколаев 30 NIZH SystemNET Наколаев 31 NKRS HIK севропромсервіс» Никополь, Днепропетровская обл. 32 NKPL SystemNET Прилуки, Черниговская обл. 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская обл. 34 POLV SystemNET	14	IZRS	UKH3Y NGONET	Измаил, Одесская оол.
16 FDKS CKH3У Федосия, Крым 17 KHAR ГАО HAHY, IGS/EPN Харьков 18 KIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоград,	15	IZUM	NGCNEI	Изюм, Харьковская оол.
17 КНАК IAO HAHY, IGS/EPN Харьков 18 КIRV TNT-TPI GNSS Network Кировоградская обл. 19 KORP IAO HAHY Короп, Черниговская обл. 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривой Рог, Днепропетровская обл. 22 KTVL IAO HAHY, EPN Кашивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 26 LUBR SystemNET Любар, Житомирская обл. 27 MAGD SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Магдалиновка, Днепропетровская обл. 29 MIKL HДI TK, IGS/EPN Николаев 30 NIZH SystemNET Наколаев 32 NKPL SystemNET Николаев 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская обл. 34 POLV SystemNET Полтава 35 PRVM NGCNET Прилуки, Черниговская обл. 36 PRYL SystemNET Прилуки, Черниговская обл. <td>16</td> <td>FDRS</td> <td>CKH3y</td> <td>Феодосия, Крым</td>	16	FDRS	CKH3y	Феодосия, Крым
18 КИКV INI-1PI GNSS Network Кировоград, Кировоская, бл. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Kauhar, Kpim 23 LGZV NGCNET Магдалиновка, Днепропетровская, обл. 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавса 25 LGRS CKH3Y Магдалиновка, Днепропетровская, обл. 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепропетровская, обл. 27 MAGD SystemNET Николаев 30 ORIH T.TT-IFI GNSS Network Юрехов, Запорожская	17	KHAR	TAO HAHY, IGS/EPN	Харьков
19 KORP IAO HAHY Короп, Черниговская обл. 20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривой Рог, Днепролегровская обл. 22 KTVL FAO HAHY, EPN Кацивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Луганск 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепролегровская обл. 27 MAGD SystemNET Магдалиновка, Днепролегровская обл. 28 MALN SystemNET Магин, Житомирская обл. 29 MIKL HДI FK, IGS/EPN Николаев 30 NIZH SystemNET Накополь, Днепропетровская обл. 31 NKRS HITK «Свропромсервіс» Никополь, Днепропетровская обл. 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская обл. 34 POLV SystemNET Прилуки, Черниговская обл. 35 PRVM NGCNET Прилуки, Черниговская обл. 36 PRYL SystemNET Прилуки, Черниговская обл. 37 RVNE ZAKPOS/UA-EUPOS Ровно 38 SHAB	18	KIRV	TNT-TPI GNSS Network	Кировоград, Кировоградская обл.
20 KPSK NGCNET Купянск, Харьковская обл. 21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривой Рог, Днепропетровская обл. 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская обл. 24 LBRS CKH3V Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 26 LUBR SystemNET Любар, Житомирская обл. 27 MAGD SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 29 MIKL HДI ГК, IGS/EPN Николаев 30 NIZH SystemNET Наколаев 31 NKRS HIIK «Баропромсервіс» Николаев 32 NKPL SystemNET Николаев 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская обл. 34 POLV SystemNET Полтава 35 PRVM NGCNET Первомайск, Харьковская обл. 36 PRYL SystemNET Прилуки, Черниговская обл. 37 RVNE ZAKPOS/UA-EUPOS Ровно 38 SHAB SystemNET Кневская обл. 40 SKVR SystemNET Саврок Киевская обл.	19	KORP	ТАО НАНУ	Короп, Черниговская обл.
21 KRRG TNT-TPI GNSS Network Кривой Рог, Днепропетровская обл. 22 KTVL ГАО НАНУ, ЕРN Кацивели, Крым 23 LOZV NGCNET Лозовая, Харьковская область 24 LBRS CKH3Y Лубны, Полтавская обл. 25 LGRS CKH3Y Луганск 26 LUBR SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 28 MALN SystemNET Магдалиновка, Днепропетр. обл. 29 MIKL HДI ГК, IGS/EPN Николаев 30 NIZH SystemNET Нежин, Черниговская обл. 31 NKRS HIIK «Свропромсервіс» Николаев 32 NKPL SystemNET Наколаев 33 ORIH TNT-TPI GNSS Network Орехов, Запорожская обл. 34 POLV SystemNET Первомайск, Харьковская обл. 35 PRVM NGCNET Прилуки, Черниговская обл. 36 PRYL SystemNET Прилуки, Черниговская обл. 37 RVNE ZAKPOS/UA-EUPOS Ровно 38 SHAB SystemNET Шабо, Одесская обл. 39 SHEV SystemNET Канев, Киевская обл. 40 SKVR SystemNET Канев, Киевская обл.	20	KPSK	NGCNET	Купянск, Харьковская обл.
22КTVLГАО НАНУ, ЕРNКацивели, Крым23LOZVNGCNETЛозовая, Харьковская обл.24LBRSCKH3YЛубны, Полтавская обл.25LGRSCKH3YЛуганск26LUBRSystemNETЛюбар, Житомирская обл.27MAGDSystemNETМагдалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМаглин, Житомирская обл.29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНехин, Черниговская обл.31NKRSHIIK «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНиколаев33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystemNETПрилуки, Черниговская обл.35PRVMNGCNETПрилуки, Черниговская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.38SHABSystemNETПрилуки, Черниговская обл.39SHEVSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETВаторожская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатунич, Киевская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗаторожская обл.48ZLSTSystemNETЗатороговская обл.49ZOC	21	KRRG	TNT-TPI GNSS Network	Кривой Рог, Днепропетровская обл.
23LOZVNGCNETЛозовая, Харьковская область24LBRSCKH3VЛубны, Полтавская обл.25LGRSCKH3VЛуганск26LUBRSystemNETЛюбар, Житомирская обл.27MAGDSystemNETМагдалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл31NKRSHITK «Європромсервіс»Никополь, Днепропетровская обл.32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystemNETПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.38SHABSystemNETПабо, Олесская обл.39SHEVSystemNETШабо, Олесская обл.40SKVRSystemNETСлавутич, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETБагорожская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.44VATUSystemNETСлавутич, Киевская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.48ZLSTSystemNETВаторожская обл.47VNRSCK	22	KTVL	ГАО НАНУ, ЕРМ	Кацивели, Крым
24LBRSСКНЗУЛубны, Полтавская обл.25LGRSСКНЗУЛуганск26LUBRSystemNETЛюбар, Житомирская обл.27MAGDSystemNETМатдалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл.29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНиколаев32NKRSHIK «Європромсервіс»Николаев33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystemNETПолтава35PRVMNGCNETПрилуки, Черниговская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКинев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETСавутич, Киевская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.48ZLSTSystemNETБанучи, Черкасская обл.48ZLSTSystemNETБанучи, Киевская обл.4970CHNGCNETЗапатоустовка, Днепропетровская обл.	23	LOZV	NGCNET	Лозовая, Харьковская область
25LGRSСКНЗУЛутанск26LUBRSystemNETЛюбар, Житомирская обл.27MAGDSystemNETМагдалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл.29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSHITK «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНиколаев33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПибао, Одесская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystem.NETШабо, Одесская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.48ZLSTSystemNETВатукорская обл.48ZLSTSystemNETЗапатоустовка, Днепропетровская обл.	24	LBRS	СКНЗУ	Лубны, Полтавская обл.
26LUBRSystemNETЛюбар, Житомирская обл.27MAGDSystemNETМаглалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSHПК «Європромсервіс»Никопаев32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystemNETПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.40SKVRSystemNETСлавутич, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	25	LGRS	СКНЗУ	Луганск
27MAGDSystemNETМагдалиновка, Днепропетр. обл.28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSHПК «Европромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНиколаев33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETШабо, Одесская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystem.NETШабо, Одесская обл.40SKVRSystemNETКанев, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETСлавутич, Киевская обл.44VATUSystemNETВатутичо, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутичо, Черкасская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	26	LUBR	SystemNET	Любар, Житомирская обл.
28MALNSystemNETМалин, Житомирская обл29MIKLHДI ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSHITK «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНиколаев33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКиевская обл.40SKVRSystemNETСлавутич, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETВатутичо, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗатоустовка, Днепропетровская обл.	27	MAGD	SystemNET	Магдалиновка, Днепропетр. обл.
29МІКLНДІ ГК, IGS/EPNНиколаев30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSНПК «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkОрехов, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETУмань, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗатагоустовка, Днепропетровская обл.	28	MALN	SystemNET	Малин, Житомирская обл
30NIZHSystemNETНежин, Черниговская обл.31NKRSНПК «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkOpexoв, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКиевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.47VNRSCKH3УВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗатурико, Черкасская обл.	29	MIKL	НДІ ГК, IGS/EPN	Николаев
31NKRSНПК «Європромсервіс»Николаев32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkOpexoв, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКиевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETВатутино, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВатутино, Черкасская обл.47VNRSCKH3УВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	30	NIZH	SystemNET	Нежин, Черниговская обл.
32NKPLSystemNETНикополь, Днепропетровская обл.33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkOpexob, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.43UMANSystemNETВатутино, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSCKH3YВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	31	NKRS	НПК «Європромсервіс»	Николаев
33ORIHTNT-TPI GNSS NetworkOpexob, Запорожская обл.34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	32	NKPL	SystemNET	Никополь, Днепропетровская обл.
34POLVSystem.NET, IGS, EPNПолтава35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSГернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВлиница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗоличев, Харьковская обл.	33	ORIH	TNT-TPI GNSS Network	Орехов, Запорожская обл.
35PRVMNGCNETПервомайск, Харьковская обл.36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSГернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	34	POLV	System.NET, IGS, EPN	Полтава
36PRYLSystemNETПрилуки, Черниговская обл.37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSГернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	35	PRVM	NGCNET	Первомайск, Харьковская обл.
37RVNEZAKPOS/UA-EUPOSРовно38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystemNETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	36	PRYL	SystemNET	Прилуки, Черниговская обл.
38SHABSystemNETШабо, Одесская обл.39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystem.NETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	37	RVNE	ZAKPOS/UA-EUPOS	Ровно
39SHEVSystemNETКанев, Киевская обл.40SKVRSystem.NETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	38	SHAB	SystemNET	Шабо, Одесская обл.
40SKVRSystem.NETСквира, Киевская обл.41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВинница47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗалоуская, Днепропетровская обл.	39	SHEV	SystemNET	Канев, Киевская обл.
41SLVCSystemNETСлавутич, Киевская обл.42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.	40	SKVR	System.NET	Сквира, Киевская обл.
42TERNZAKPOS/UA-EUPOSТернополь43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSCKH3УВинница48ZLSTSystemNETЗолочев, Харьковская обл.	41	SLVC	SystemNET	Славутич, Киевская обл.
43UMANSystemNETУмань, Черкасская обл.44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSCKH3УВинница48ZLSTSystemNETЗолочев, Харьковская обл.	42	TERN	ZAKPOS/UA-EUPOS	Тернополь
44VATUSystemNETВатутино, Черкасская обл.45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.4970CHNGCNETЗолочев, Харькорская обл.	43	UMAN	SystemNET	Умань, Черкасская обл.
45VESLTNT-TPI GNSS NetworkВеселое, Запорожская обл.46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.4970CHNGCNETЗолочев, Харькорская обл.	44	VATU	SystemNET	Ватутино. Черкасская обл.
46VLCHNGCNETВолчанск, Харьковская обл.47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.4970CHNGCNETЗолочев, Харьковская обл.	45	VESL	TNT-TPI GNSS Network	Веселое, Запорожская обл.
47VNRSСКНЗУВинница48ZLSTSystemNETЗлатоустовка, Днепропетровская обл.49ZOCHNGCNETЗолочев, Харькорская обл.	46	VLCH	NGCNET	Волчанск, Харьковская обл.
48 ZLST SystemNET Златоустовка, Днепропетровская обл. 49 ZOCH NGCNET Золочев, Харькорская обл.	47	VNRS	СКНЗУ	Винница
40 ZOCH NGCNET Souther Sanders Sanders Sanders	48	ZLST	SystemNET	Златоустовка. Лнепропетровская обл
T = T = T = T = T = T = T = T = T = T =	49	ZOCH	NGCNET	Золочев. Харьковская обл
50 ZPRS CKH3Y Запорожье	50	ZPRS	СКНЗУ	Запорожье

Таблица 1. Общий перечень ГНСС-станций Украины, наблюдения которых были использованы при моделировании ПЭС ионосферы

апробированных глобальных моделей Klobuchar и GIM IONEX IGS.

Такой подход, когда для решения задачи восстановления распределения ПЭС используются однозначные линейные комбинации высокоточных фазовых GF-наблюдений без использования кодовых ГНСС наблюдений, на взгляд авторов, представляется новым, реализующим более высокую точность моделирования и имеющим перспективы развития по сравнению с известными методами решения поставленной задачи. Правомочность этого оптимистичного утверждения подтверждена многочисленными экспериментальными результатами [5, 6, 9].

Для проведения экспериментальных исследований были спланированы и осуществлены сбор и послесеансная обработка ГНСС (GPS) наблюдений (темп 1 с) сети выбранных станций Украины (до 50 станций), накопленных на выбранных сутках (10 января и 19 июня 2013 г.) для сопоставления зимней и летней ионосферной активности. Следует отметить, что уровень солнечной активности в 2013 г. был близок к пику очередного 11-летнего цикла. GPS-наблюдения для проведения исследований были представлены следующими организациями: ГАО НАН Украины (Киев), АО НИИРИ/ГКАУ (Харьков, сеть станций «Системы космического навигационно-временного обеспечения Украины»), НИИ геодезии и картографии (Киев), ХНУРЭ (Харьков), коммерческими компаниями «System Solutions» (Киев), ТНТ-ТПИ (Днепропетровск), «Навигационно-геодезический центр» (Харьков), ZAKPOS/UA-EUPOS (Мукачево). Перечень станций «кооперативной» сети, наблюдения которых были включены в обработку, представлен в табл. 1.

Обработка накопленных данных выполнялась с использованием собственных разработок программно-математического обеспечения программного комплекса OCTAVA [3], а также с использованием известных зарубежных специализированных программных продуктов — BERNESE (Швейцария) и GrafNav/GrafNet (Канада) для сопоставления и верификации промежуточных результатов обработки ГНССнаблюдений.

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В практике обработки ГНСС-наблюдений применяется их линейное комбинирование с целью уменьшения (либо полной компенсации) погрешностей (дифференциальный метод), выделение ионосферных задержек («безгеометрические» комбинации), формирование комбинаций наблюдений с компенсацией тех или иных неизвестных (т. н. одинарные и двойные разности) и др. Все перечисленные линейные комбинации и их свойства детально описаны в многочисленных источниках, в частности в фундаментальных монографиях [1, 17, 20].

Для пояснения вышеизложенного приведём в упрощенном виде уравнения «безгеометрических» GF-комбинаций кодовых ($\hat{S}_{GF,i}^{j}$) и фазовых ($\hat{L}_{GF,i}^{j}$) псевдодальностей двух частот [1, 2], которые позволяют выделить информацию об ионосферных задержках сигналов ГНСС на трассах «спутники — приемники»:

$$\begin{aligned} \widehat{S}_{GF,i}^{j}(t_{k}) &= \widehat{S}_{1,i}^{j}(t_{k}) - \widehat{S}_{2,i}^{j}(t_{k}) = \\ &= -[\gamma^{2} - 1] \cdot I_{i}^{j}(t_{k}) + [DCB^{j} + IFB_{i}] + \delta S_{GF,i}^{j}(t_{k}), \\ \widehat{L}_{GF,i}^{j}(t_{k}) &= \widehat{L}_{1,i}^{j}(t_{k}) - \widehat{L}_{2,i}^{j}(t_{k}) = \\ &= [\gamma^{2} - 1] \cdot I_{i}^{j}(t_{k}) + [b_{\varphi_{GF,i}} - B_{\varphi_{GF}}^{j}] - \\ &- [(N_{1,i}^{j} \cdot \lambda_{1} - N_{2,i}^{j} \cdot \lambda_{2}) + (\phi_{0,i} - \phi_{0}^{j})(\lambda_{2} - \lambda_{1})] + \\ &+ \phi_{wup}^{j}(t_{k}) \cdot (\lambda_{2} - \lambda_{1}) + \delta L_{GF,i}^{j}(t_{k}), \end{aligned}$$
(1)

где $\widehat{S}_{(1,2),i}^{j}, \widehat{L}_{(1,2),i}^{j}$ — измеренные кодовые и фазовые псевдодальности (*i* — индекс приемника, *j* — индекс спутника, t_{k} — текущий момент времени), $I_{i}^{j}(t_{k})$ — наклонные ионосферные задержки на трассах «спутники — приемники» на частоте *L*1, задержки $I_{i}^{j}(t_{k})$ могут быть представлены в эквивалентных значениях ПЭС (*TEC*) в единицах TECU [21] через известные соотношения, $\gamma = f_{L1} / f_{L2} = \lambda_{2} / \lambda_{1}, \lambda_{1}, \lambda_{2}$ — длины волн несущих сигналов, *IFB_i* — кодовые межчастотные разности задержек в трактах приемников станций сети, *DCB^j* — кодовые межчастотные разности задержек в трактах спутников (оценки этих параметров формируют и предоставля-



Рис. 1. Модель «тонкого слоя» и угловые координаты подыоносферных точек

ют потребителям международные центры IGS), $b_{\varphi_{GF,j}}, B_{\varphi_{GF}}^{j}$ — межчастотные фазовые задержки в трактах приемников (b) и спутников (B), $N_{(1,2)i}^{j}$ целочисленные фазовые неоднозначности, φ_{0i} случайные начальные (в циклах) фазы опорных генераторов приемников, φ_{0}^{j} — фазы спутников, $\varphi_{wup}^{j}(t_{k})$ — т. н. «wind-up» эффекты фазовых набегов, обусловленных вращением антенн спутников (моделируются с высокой точностью), $\delta S_{GF,i}^{j}(t_{k}), \delta L_{GF,i}^{j}(t_{k})$ — шумы и многолучевость кодовых и фазовых GF-наблюдений соответственно. Также полагаем известными (оцениваются с необходимой точностью) статистические характеристики шумовых и многолучевых погрешностей GF-наблюдений.

Моделирование распределения ПЭС выполнялось для региональной области пространства (сектор сферы — «шапка»), размер которой выбирался исходя из конфигурации сети ГНССстанций Украины. Параметрами модели являются угловые координаты $\Theta_{C_{(I,r)}}$, $\lambda_{C_{(I,r)}}$ подыоносферных точек (см. рис. 1), которые определяются по точкам прокола «тонкого слоя» ионосферы лучами «спутники — приемники». Высота тонкого слоя ионосферы, с учетом рекомендаций ряда работ, была выбрана равной 400 км.

Для моделирования регионального пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы использовано известное представление разложения ПЭС по сферическим функ-

циям [21]:

$$A_{n}^{m} \cos m\lambda_{c_{(i,r)}} + B_{n}^{m} \sin m\lambda_{c_{(i,r)}} = = (\cos[\phi'_{(i,r)}^{j}(t_{k})])^{-1} \cdot \sum_{n=0}^{N} \sum_{m=0}^{n} P_{n}^{m} (\cos \Theta_{c_{(i,r)}}) \times \times [A_{n}^{m} \cos m\lambda_{c_{(i,r)}} + B_{n}^{m} \sin m\lambda_{c_{(i,r)}}], I_{V(i,r)}^{j}(t_{k}) = VTEC_{(i,r)}^{j}(t_{k}) = = VTEC \Big[\Theta_{C_{(i,r)}}^{j}(t_{k}), \lambda_{C_{(i,r)}}^{j}(t_{k}), A_{n}^{m}, B_{n}^{m}\Big],$$
(2)

где $(\cos[\phi'_{(i,r)}(t_k)])^{-1}$ — функции отображения, связывающие вертикальные ионосферные задержки $I_{V_i}^j(t_k)$ (или $VTEC_{(i,r)}^j(t_k)$) и наклонные задержки $I_i^j(t_k)$ (или $STEC_{(i,r)}^j(t_k)$) в «точках прокола»; $P_n^m(\cos\Theta_{C_{(i,r)}})$ — присоединенные полиномы Лежандра; A_n^m, B_n^m — коэффициенты сферического разложения; индекс r соответствует референцной станции; индекс i — другим станциям сети, параметры A_n^m, B_n^m рассмотренной модели оцениваются на отдельных равнодискретных интервалах времени, где ПЭС ионосферы условно предполагается «замороженным».

Существенное уменьшение числа оцениваемых параметров позволяет использование однозначных дифференциальных GF-наблюдений. Для этого выполнено РФН на всех базовых линиях сети. В этом случае линейное комбинирование GF-наблюдений референцной станции и однозначных дифференциальных GF-наблюдений



Рис. 2. Одинарные разности оценок GF-наблюдений на базовой линии «VATU — GLSV» (~154 км): *a* — 10 января, *б* — 19 июня 2013 г. и «ZPRS — GLSV» (~442 км): *в* — 10 января, *г* — 19 июня 2013 г.

сети дает финальную систему уравнений, которая с учетом (1), (2) имеет вид

$$\begin{cases} \widehat{F}_{r}^{j}(t_{k}) = (\cos[\phi'_{(i,r)}^{j}(t_{k})])^{-1} \cdot I_{V_{r}}^{j}(t_{k}) + C_{r}^{j} + \delta F_{r}^{j}(t_{k}), \\ \widehat{F}_{i}^{j}(t_{k}) = (\cos[\phi'_{(i,r)}^{j}(t_{k})])^{-1} \cdot I_{V_{i}}^{j}(t_{k}) + C_{r}^{j} + D_{i-r} + \delta F_{i}^{j}(t_{k}), \end{cases}$$
(3)

где

$$\widehat{F}_{(i,r)}^{j}(t_{k}) = (\gamma^{2} - 1)^{-1} \cdot [\widehat{L}_{GF,(i,r)}^{j}(t_{k}) - \hat{\phi}_{wup_{(i,r)}}^{j}(t_{k}) \cdot (\lambda_{1} - \lambda_{2})],$$

$$D_{i-r} = (\gamma^2 - 1)^{-1} \cdot \Delta b_{i-r} ,$$

$$C_r^j = (\gamma^2 - 1)^{-1} [(b_{\varphi_{GF,r}} - B_{\varphi_{GF}}^j) - (\phi_{0,r} - \phi_0^j)(\lambda_2 - \lambda_1) - (N_{1,r}^j \cdot \lambda_1 - N_{2,r}^j \cdot \lambda_2)].$$

Здесь Δb_{i-r} — неизвестные параметры, принятые постоянными на суточном интервале наблюдений для каждой базовой линии «*i* – *r*» сети станций, не зависящие от спутников, включающие межчастотные аппаратурные задержки и случайные начальные фазы часов приемников.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 6

МНК-решение системы уравнений (3) предполагало совместное оценивание параметров распределения ПЭС ионосферы A_n^m , B_n^m (на каждом подынтервале Δt «замороженности» ионосферы, обычно Δt выбирают в интервале 30...120 мин) и мешающих параметров C_r^j и D_{i-r} . Коэффициенты C_r^j являются «уникальными» для каждого из проходов спутников (в зоне радиовидимости) и общими для всех станций сети, а коэффициенты D_{i-r} оценивались для каждой базовой линии на всём (суточном) интервале наблюдений.

В качестве главной (референцной) была выбрана IGS-станция GLSV (Киев), а ее наблюдения были использованы для формирования и обработки «нулевых» GF-комбинаций и одинарных разностей наблюдений. Все GFнаблюдения были пересчитаны для частоты L1 GPS, после чего выполнялась фильтрация/сглаживание всех GF-наблюдений с использованием кубических сплайнов. На рис. 2 приведены оценки одинарных разностей GF-наблюдений, которые являются эквивалентом ионосферных задержек (с точностью до константы — остаточной неоднозначности референцного спутника), полученные на различных базовых удалениях.

Следует отметить, что форма представления модели является гибкой и разрешает сохранять данные в удобной для конкретной задачи форме. Например, это может быть представление модели в виде ионосферных карт, аналогично тому, как представлены модели GIM IONEX или SBAS. Также для расчета ионосферных задержек возможно использовать набор функций, описывающих изменения коэффициентов модели во времени.

Здесь и далее для рассматриваемой региональной модели ПЭС будем использовать условное наименование SCHM (Spherical Cap Harmonic Model) [18, 19].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

В ходе выполнения пунктов *первого этапа* цикла обработки наблюдений (см. выше) перед моделированием ПЭС ионосферы из обработки были исключены участки наблюдений с длительностью менее получаса. Также из обработки были исключены проходы спутников, которые «видят» менее чем 10 станций. В результате для этапа моделирования ПЭС был получен уточненный перечень проходов спутников, на 10 % меньший исходного.

В ходе моделирования совместно оценивались параметры ионосферной модели и мешающие параметры. Оценки параметров модели ионосферной задержки выполнялись на интервалах «замороженности» от 300 до 7200 с с изменениями порядка и степени аппроксимирующих сферических функций — от 2-го до 4-го. Примеры статистических характеристик невязок модельных задержек относительно GF-наблюдений для 10 января 2013 г. представлены в табл. 2.

Анализ показал, что чрезмерное уменьшение интервала «замороженности» ионосферы или увеличение порядка и степени модели, так же, как и использование для оценивания длительных интервалов и малых значений порядка и степени модели приводят к увеличению расхождений модели и GF-наблюдений. Наибольшая точность аппроксимации фазовых GF-наблюдений достигается с использованием интервалов оценивания параметров \hat{A}_n^m, \hat{B}_n^m в диапазоне 900...1800 с (15...30 мин) для 2-го и 3-го порядка и степени модели.

Чтобы оценить влияние варьируемых параметров модели на восстановление распределения ПЭС для каждого из вариантов рассчитывались

Таблица 2. Статистические характеристики невязок подбираемой модели относительно GF-наблюдений (10 января 2013 г.) при двух значениях угла места *h*

Интервал /	β=	25°	$\beta = 10^{\circ}$		
порядок и сте- пень модели	среднее, см	СКО, см	среднее, см	СКО, см	
300 c / 4	0.2	16.2	0.3	46.4	
900 c / 2	0.5	18.3	0	20.7	
900 c / 3	0.3	17.2	0	19.3	
1800 c / 2	0.5	19.7	0	22.7	
1800 c / 4	0.3	18.4	0	20.6	
3600 c / 2	0.7	24.4	0	27.8	
7200 c / 2	0.7	33.7	0	39.1	



Рис. 3. Примеры суточных изменений вертикальных ионосферных задержек для крайних точек зоны моделирования ПЭС: *а* – интервал оценивания 5 мин, 4-й порядок модели; *б* – интервал оценивания 15 мин, 2-й порядок модели; *в* – интервал оценивания 30 мин, 2-й порядок модели; *е* – интервал оценивания 2 ч, 2-й порядок модели

суточные вертикальные ионосферные задержки для виртуальных станций сети, расположенных на краях области моделирования по направлениям Юг, Запад, Восток и центр (рис. 3).

Как видно из приведенных рисунков, уменьшение интервала «замороженности» или увеличение порядка модели может приводить к возникновению значительных краевых эффектов в области моделирования, при увеличении же интервала «замороженности» параметров ПЭС или уменьшении порядка модели происходит потеря информации и увеличение погрешностей моделирования. Причиной возникновения краевых эффектов является неравномерность распределения подыоносферных точек (точек прокола) ионосферы.

На рис. 4 приведены распределения точек прокола ионосферы в области моделирования для двух соседних интервалов оценивания параметров ПЭС ионосферы, длительностью 5 и 60 мин. Окружностью большего радиуса отмечена основная область моделирования (на поверхности Земли $R \approx 430$ км), окружностью меньшего радиуса (на поверхности Земли $R \approx 280$ км) отмечена область, где влияние краевых эффек-



Рис. 4. Примеры распределения точек прокола ионосферы по области моделирования на интервалах оценки параметров \hat{A}_{n}^{m} , \hat{B}_{n}^{m} различной длительности

тов из-за малых интервалов оценки или высоких порядков полинома заметно меньше.

Из анализа распределений точек прокола ионосферы также следует важный вывод — дальнейшее увеличение плотности сети станций не приведет к существенному повышению точности модели. Увеличить равномерность распределения точек прокола и выполнить моделирование



Рис. 5. Суточные изменения вертикальных ионосферных задержек для виртуальных ГНСС-станций, расположенных в центре и крайних точках сети (для расчетов использованы оптимальные параметры модели)

Рис. 6. Значения СКО параметров \hat{C}_r^j и \hat{D}_{i-r}

для более коротких интервалов оценки параметров ПЭС ионосферы позволит привлечение наблюдений спутников других ГНСС (ГЛОНАСС, Beidou/Compass, Galileo).

Таким образом, исходя из анализа полученных результатов, для моделирования ПЭС ионосферы и ряда тестовых сравнительных оценок рекомендовано использовать получасовой интервал (1800 с) оценки и 2-й порядок модели. Примеры распределений ПЭС ионосферы для зимнего и летнего сезонов показаны на рис. 5.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕЕ ВАЛИДАЦИЯ

Для оценки точности определения параметров ионосферной модели SCHM, степени её близос-

Рис. 7. Гистограммы невязок *R* «нулевых» разностей GF-наблюдений относительно различных ионосферных моделей для 10 января 2013 г. (*a*, *б*) и 19 июня 2013 г. (*в*, *г*)

ти глобальной модели GIM IONEX IGS выполнен сравнительный анализ расхождений фазовых GF-наблюдений и ионосферных задержек, рассчитанных с использованием моделей GIM IONEX и SCHM. Для валидации предложенной модели выполнены абсолютные и дифференциальные координатные определения с использованием трех различных моделей ПЭС ионосферы — моделей Klobuchar, GIM IONEX и SCHM.

Самым простым способом оценки точности параметров модели является анализ корреля-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2015. Т. 21. № 6

ционной матрицы погрешностей МНК-оценок искомых параметров. В этом случае следует либо достаточно точно учитывать корреляцию GF-наблюдений по времени, что затруднительно, либо, оценив интервалы корреляции рядов GF-наблюдений, использовать для оценки точности некоррелированные отсчеты. В данной работе для оценки точности определяемых параметров был использован метод декорреляции погрешностей (вариаций ПЭС) GFнаблюдений.

Рис. 8. Пример «нулевых» разностей оценок ионосферных задержек *I: а* — проход 8, спутник SV25, станция GLSV (10 января 2013 г.), *б* — проход 8, спутник SV23, станция GLSV (19 июня 2013 г.), *в* — проход 12, спутник SV21, станция GLSV (10 января 2013 г.), *е* — проход 9, спутник SV13, станция GLSV (19 июня 2013 г.)

Оценки точности определения параметров модели $\hat{A}_{n}^{m}, \hat{B}_{n}^{m}$ только косвенно содержат информацию о погрешностях определения вертикальных ионосферных задержек по модели, в то время как точность оценок мешающих параметров (фазовых констант) $\hat{C}_{r}^{j}, \hat{D}_{i-r}$ фактически оп-

ределяет и точность моделирования вертикальных ионосферных задержек.

Оценки параметров \hat{C}_{r}^{j} , \hat{D}_{i-r} могут достигать больших значений и варьируются в зависимости от выбранных параметров модели ПЭС. Как показали эксперименты, на интервалах оценивания параметров распределения ПЭС ионосферы до 30 мин оценки коэффициентов \hat{C}_{r}^{j} и \hat{D}_{i-r} изменяются незначительно. Отметим, что такие интервалы времени наблюдений характерны для радиозатменных методов восстановления профиля электронной концентрации, предусмотренных в проекте «Ионосат-Микро»). При увеличении интервала оценивания параметров модели ПЭС ионосферы (интервала «замороженности» ионосферы) до 2 ч коэффициенты \hat{C}_{r}^{j} , рассчитанные по модели SCHM, становятся ближе к значениям коэффициентов \hat{C}_{r}^{j} , рассчитанных с использованием модели GIM IONEX. Это объясняется тем, что сама модель GIM

IONEX также оценивается (и предоставляется потребителям в виде сеточных карт) на интервале 2 ч. Значения СКО параметров \hat{C}_{r}^{j} , \hat{D}_{i-r} по-казаны на рис. 6.

Как видно, оценивание параметров \hat{C}_{r}^{j} и \hat{D}_{i-r} (совместно с параметрами модели) выполняется очень точно. Так, СКО оценок \hat{C}_{r}^{j} в среднем не превышает 10 см, а СКО оценок \hat{D}_{i-r} в среднем составляет 2...3 см.

Один из важных способов оценки точности моделирования ПЭС ионосферы заключался в проведении сравнительного анализа «нулевых» и одинарных разностей оценок фазовых GF-наблюдений и ионосферных задержек, рассчитанных с использованием различных моделей.

Таблица 3. Статистические характеристики невязок «нулевых» разностей GF-наблюдений и различных ионосферных моделей при двух значениях угла места *h*

Hangaray		$\beta = 25^{\circ}$		$\beta = 10^{\circ}$					
певязки	среднее, см СКО, см <i>RMS</i> , см		среднее, см	СКО, см	<i>RMS</i> , см				
10 января 2013 г.									
«GF – SCHM»	0	18	18	0	21	21			
«GF – GIM IONEX»	-49	-49 34		-56	45	72			
«GIM IONEX – SCHM»	49	49 27		56	40	69			
19 июня 2013 г.									
«GF – SCHM»	3	18	18	0	20	20			
«GF – GIM IONEX»	-101	37	108	-111	44	120			
«GIM IONEX – SCHM»	102	31	106	111	39	119			

Таблица 4. Статистические характеристики невязок одинарных разностей GF-наблюдений и расчетных задержек с использованием моделей SCHM и GIM IONEX при двух значениях угла места h

Hangayay		$\beta = 25^{\circ}$		$\beta = 10^{\circ}$						
невязки	среднее, см СКО, см <i>RMS</i> , см		<i>RMS</i> , см	среднее, см	СКО, см	<i>RMS</i> , см				
10 января 2013 г.										
«GF – SCHM»	-2	19	19	0	21	21				
«GF – GIM IONEX»	-3	23	23	-3	25	25				
«GIM IONEX – SCHM»	1	25	25	2	27	27				
19 июня 2013 г.										
«GF – SCHM»	-4	21	21	-1	22	22				
«GF – GIM IONEX»	-1	31	31	~0	29	29				
«GIM IONEX – SCHM»	-3	29	29	-1	32	32				

Рис. 9. Гистограммы невязок *R* одинарных разностей GF-наблюдений и расчетных задержек с использованием моделей SCHM и GIM IONEX 10 января (*a*, *б*) и 19 июня 2013 г. (*в*, *г*)

На рис. 7 представлены результаты расчетов гистограмм «нулевых» разностей GF-наблюдений и расчетных (по моделям) значений ионосферных задержек «GF — SCHM», «GF — GIM IONEX». Статистические характеристики указанных разностей представлены в табл. 3. Примеры сравнения оценок ионосферных задержек приведены на рис. 8. Сравнительный анализ рассматриваемых характеристик ионосферных моделей SCHM и GIM IONEX показал наличие смещений, уровень которых достигает значений от 0.5 до 1 м, но лежит в пределах погрешности модели GIM IONEX IGS (2...8 TECU, или 30...130 см).

Сравнение моделей SCHM и GIM IONEX выполнено также и для дифференциального ре-

Рис. 10. Пример одинарных разностей оценок ионосферных задержек: *а* — для SV25 на базовой линии «LBRS — GLSV» (~182 км, 10 января 2013 г.), *б* — для SV20 на базовой линии «LBRS — GLSV» (~182 км, 19 июня 2013 г.), *в* — для SV12 на базовой линии «ALCI — GLSV» (~645 км, 10 января 2013 г.), *е* — для SV16 на базовой линии «DNCK — GLSV» (~594 км, 19 июня 2013 г.)

жима позиционирования. Примеры гистограмм невязок одинарных разностей «GF — SCHM», «GF — GIM IONEX» показаны на рис. 9, а статистические характеристики невязок представлены в табл. 4. Примеры сравнения оценок ионосферных задержек приведены на рис. 10. Как следует из представленных результатов, смещения расчетных значений ионосферных задержек между моделями SCHM и GIM IONEX в данном слу-

	Модель	Crearran	Разброс, м			Klobuchar / SCHM		GIM IONEX / SCHM	
Станция		Среднее, м	<i>p</i> = 0.68	<i>p</i> = 0.95	<i>p</i> = 0.997	среднее, %	разброс, % p = 0.997	среднее, %	разброс, % <i>p</i> = 0.997
10 января 2013 г.									
GLSV	Klobuchar	2.01	2.85	4.66	5.85	99	69		
0201	GIM IONEX	0.20	0.54	1.14	1.88		0,5	85	5
	SCHM	0.03	0.58	1.12	1.79			00	U U
ALCI	Klobuchar	0.79	2.74	4.83	5.6	82	38		
	GIM IONEX	0.12	0.67	1.35	2.09			-17	-3
	SCHM	0.14	0.70	1.38	2.15				
KTVL	Klobuchar	2.14	3.09	4.83	5.44	87	65		
	GIM IONEX	0.54	0.86	1.77	2.57			46	3
	SCHM	0.29	0.72	1.71	3.36				
KHAR	Klobuchar	2.09	2.92	4.94	5.77	99	62		
	GIM IONEX	0.27	0.65	1.32	2.13			89	-4
	SCHM	0.03	0.67	1.30	2.22				
KRRS	Klobuchar	2.02	2.80	4.76	5.62	96	64		
	GIM IONEX	0.28	0.70	1.45	2.32			68	13
	SCHM	0.09	0.64	1.34	2.02				
LBRS	Klobuchar	2.00	2.77	4.80	5.66	96	66		
	GIM IONEX	0.24	0.67	1.44	2.56			67	24
	SCHM	0.08	0.69	1.29	1.94				
ZLST	Klobuchar	2.03	2.85	4.88	5.17	95	66		
	GIM IONEX	0.30	0.60	1.24	1.95			30	9
	SCHM	0.10	0.58	1.0	1.77				
ZPRS	Klobuchar	2.10	2.90	4.91	5.39	98	63		
	GIM IONEX	0.37	0.71	1.35	2.10			86	5
	SCHM	0.05	0.61	1.15	1.99				
				19 июн	ня 2013 г.				
GLSV	Klobuchar	0.44	1.09	1.86	2.47	86	38		
	GIM IONEX	0.52	0.90	1.47	2.00			89	22
	SCHM	0.06	0.58	1.15	1.88				
ALCI	Klobuchar	0.79	2.74	4.83	5.6	88	36		
	GIM IONEX	0.12	0.67	1.35	2.09			89	25
	SCHM	0.14	0.70	1.38	2.15				
KTVL	Klobuchar	2.14	3.09	4.83	5.44	51	32		
	GIM IONEX	0.54	0.86	1.77	2.57			60	24
	SCHM	0.29	0.72	1.71	3.36				
KHAR	Klobuchar	2.09	2.92	4.94	5.77	93	28		
	GIM IONEX	0.27	0.65	1.32	2.13			93	24
WDDG	SCHM	0.03	0.67	1.30	2.22	-	•		
KRRS	Klobuchar	2.02	2.80	4.76	5.62	76	28	-	
	GIM IONEX	0.28	0.70	1.45	2.32			78	17
LDDC	SCHM	0.09	0.64	1.34	2.02	0.2	24		
LBRS	Klobuchar	2.00	2.77	4.80	5.66	82	34	0.2	21
	GIM IONEX	0.24	0.67	1.44	2.56			83	31
71 67	SCHM Vlobuohar	0.08	0.09	1.29	1.94	70	40		
LL31	KIODUCHAR	2.03	2.83	4.88	J.17	19	42	0.1	20
	STIMI IUNEA	0.30	0.00	1.24	1.95			ð1	28
7000	Klobuchar	2 10	2 00	1.0	5 20	02	42		
71 V2	GIM IONEY	2.10	2.90	4.91	5.59 2.10	72	42	03	31
	SCHM	0.57	0.71	1.55	1 00			15	51
		0.05	0.01	1.15	1.77				

Таблица 5. Интегральные оценки точности координатных определений станций, полученных с использованием различных ионосферных коррекций, а также процентный выигрыш в точности позиционирования с использованием модели SCHM по сравнению с моделями Klobuchar и GIM IONEX чае существенно меньше, чем для «нулевых» разностей.

Для валидации предложенной модели были выполнены абсолютные и дифференциальные координатные определения с использованием трех различных моделей ПЭС ионосферы — Klobuchar, GIM IONEX и SCHM. Позиционирование выполнялось для станции GLSV и для станций, которые в отдельном варианте экспериментальных исследований не участвовали в моделировании ПЭС и расположены на различных базовых удалениях от геометрического центра сети. В частности, позиционирование было выполнено для станций ALCI, KTVL, KHAR, KRRS, LBRS, ZLST, ZPRS (10 января 2013 г.) и DNCK, KTVL, KHAR, KIRV, LBRS, ZLST, ZPRS (19 июня 2013 г.). Интегральные оценки точности абсолютного позиционирования приведены в табл. 5 для 10 января 2013 г. и 19 июня 2013 г. Выигрыш в точности (в процентах) координатных определений, выполненных с использованием предложенной модели SCHM по отношению к координатным определениям, выполненным с использованием моделей GIM IONEX и Klobuchar, представлен в четырех последних графах табл. 5.

Подводя итоги, отметим, что анализ невязок координатных определений и их статистических характеристик, полученных на суточном интервале наблюдений при автономном позиционировании, показал, что использование модели SCHM в среднем позволяет существенно уменьшить смещение координатных параметров станций (до 65 % зимой и до 80 % летом) и уменьшить СКО (до 10 % зимой и до 25 % летом) по отношению к случаю использования глобальной ионосферной модели GIM IONEX.

Для дифференциального режима позиционирования также выполнены координатные определения с использованием кодовых и однозначных фазовых наблюдений. Позиционирование было выполнено для базовых линий «ALCI — GLSV» (645 км), «KTVL — GLSV» (713 км) — 10 января 2013 г., а также для базовых линий «DNCK — GLSV» (594 км), «KTVL — GLSV» (713 км) — 19 июня 2013 г. Анализ статистических характеристик невязок дифференциальных фазовых координатных определений, полученных на суточной выборке наблюдений, показал, что использование модели SCHM на длинных базах (700 км) позволяет существенно уменьшить смещение (до 50...80 % зимой и до 20...30 % летом) по сравнению с глобальной моделью GIM IONEX. С уменьшением базовых линий модели становятся сопоставимы по точности и на средних базовых линиях (до 200 км) практически не различаются.

Таким образом, в целом исследования показали, что использование предложенной региональной модели SCHM позволяет существенно уменьшить смещение и СКО оценивания координат пользователей ГНСС по сравнению с глобальной ионосферной моделью GIM IONEX как при абсолютном, так и при дифференциальном позиционировании.

Предложенная модель ионосферы рекомендуется к использованию при создании системы региональных полигонов для калибровки результатов определения ионосферных профилей по данным спутника «Ионосат-Микро». Она может быть также применена в многопозиционных системах широкозонной дифференциальной навигации типа EGNOS [8, 22] для точного позиционирования по фазовым наблюдениям в режиме PPP (Precise Point Positioning [10]).

выводы

1. В результате выполненных в 2013—2014 гг. теоретических и экспериментальных исследований показана возможность создания региональной модели пространственно-временного распределения ПЭС ионосферы с использованием двухчастотных однозначных фазовых ГНСС наблюдений. Валидация модели проведена по данным сети станций Украины. Разработан прототип соответствующего программно-математического инструментария.

2. Выполнено моделирование ПЭС ионосферы с использованием суточных (10 января 2013 г. и 19 июня 2013 г.) GPS-наблюдений «кооперативной» сети около 40 перманентных референцных станций. Проведена оптимизация параметров предложенной модели по выбранным критериям. Показано, что наибольшая точность

позиционирования с использованием предложенной модели достигается, если интервал «замороженности» ПЭС ионосферы составляет 30—60 мин, а ПЭС представляется в виде разложения по сферическим функциям второй степени и второго порядка.

Таким образом, подготовлена основа для подспутникового мониторинга региональной ионосферы и калибровки спутниковых профилей электронной концентрации.

3. Валидация предложенной региональной модели ПЭС выполнена путем применения различных моделей ПЭС при ГНСС-позиционирования станций с заранее известными точными эталонными координатами и последующего сравнения результатов. Полученные сравнительные оценки точности координатных определений с использованием известных глобальных моделей ПЭС и предложенной региональной модели показали, что использование последней позволяет существенно (до 65 - 80 %) повысить точность абсолютного и дифференциального позиционирования в сравнении с глобальной моделью GIM IONEX IGS. Это объясняется главным образом использованием точных однозначных фазовых данных региональной сети вместо традиционно используемых кодово-фазовых линейных комбинаций данных глобальной сети.

4. Из анализа распределения так называемых «подыоносферных» точек на разных временных интервалах условной «замороженности» ПЭС следует, что высокая плотность наземных станций не приводит к существенному увеличению точности (пространственной разрешающей способности) моделирования ПЭС ионосферы. Увеличить точность моделирования позволит только использование наблюдений дополнительных ГНСС (ГЛОНАСС, GALILEO, BEIDOU/COMPASS). Это обеспечит более равномерное и практически независимое от интервала «замороженности» ПЭС пространственное распределение «подыоносферных» точек, и, как следствие, позволит увеличить порядок модели и улучшить ее согласованность с наблюдениями. Предложенный подход может быть реализован для регионального моделирования ПЭС в Европе, Северной Америке и Японии, что позволит существенно расширить возможности калибровки результатов спутниковых определений профиля электронной концентрации в рамках проекта «Ионосат-Микро».

5. Дальнейшее развитие предложенной модели ПЭС ионосферы возможно по таким направлениям:

• адаптации техники моделирования к работе с наблюдениями нескольких ГНСС (ГЛОНАСС, Beidou/Compass, Galileo) с целью дальнейшего повышения разрешающей способности модели ПЭС;

• использования для моделирования так называемого «конусного» представления распределения электронного содержания [16, 22], когда ПЭС строится для каждого спутника отдельно в локальных областях пространства с целью точного моделирования не только трендовой, но и вариационной составляющих ионосферных задержек сигналов ГНСС.

Авторы благодарны руководству и сотрудникам организаций НАН Украины, оказавших организационную и финансовую поддержку проекта, а также организациям, предоставившим ГНСС-наблюдения для выполнения экспериментальных исследований.

- 1. Гофманн-Велленгоф Б, Ліхтнегер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995. — 380 с.
- Жалило А. А., Желанов А. А., Бессонов Е. А., Дицкий И. В. Экспериментальная отработка программно-математического инструментария обработки наблюдений сети наземных перманентных референцных ГНСС станций Украины для оценки и моделирования полного электронного содержания ионосферы в рамках международного проекта «Ионосат-Микро» // Космический проект «Ионосат-Микро» / Под общ. ред. С. А. Засухи, О. П. Фёдорова. — Киев: Академпериодика, 2013. — С. 200—209.
- 3. Жалило А. А., Желанов А. А., Шелковенков Д. А. и др. Совместные текущие разработки и исследования ХНУРЭ и ГАО НАН Украины в области точного ГНСС-позиционирования // Тр. 4-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков, 2011. — 1, ч. 2. — С. 18—20.

- Космический проект «Ионосат-Микро» / Под общ. ред. С. А. Засухи, О. П. Фёдорова. — Киев: Академпериодика, 2013. — 218 с.
- 5. Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро». Етап 1. Експериментальне відпрацювання апаратно-програмних засобів збору, обробки та аналізу спостережень мережі наземних перманентних референцних ГНСС станцій України для оцінки і моделювання складових іоносферної затримки: наук.-техн. звіт / ГАО НАН України. № ДР 0113U002710. Київ, 2013. 69 с.
- 6. Створення системи збору, обробки та аналізу наземних і бортових космічних GPS/ГЛОНАСС спостережень для моніторингу, досліджень й моделювання повного електронного вмісту іоносфери у рамках міжнародного проекту «Іоносат-Мікро». Етап 2. Оптимізація алгоритмів оцінки та моделювання іоносферних і тропосферних затримок з використанням спостережень мереж перманентних ГНСС станцій: наук.-техн. звіт / ГАО НАН України. № ДР 0112U001418. Київ, 2014. 46 с.
- 7. *Хода О. А.* Программное обеспечение «Klio» для определения параметров ионосферы // Космічна наука і технологія. 1999. **5**, № 5/6. С. 25—32.
- Alcantarilla I., Zarraoa N., Caro J. On EGNOS and WAAS Performance // Proc. ION 61st Annual meeting The MI-TRE Corporation & Draper Laboratory. – Cambridge, MA, 2005. – P. 774–782.
- Bessonov E., Ditskiy I., Zhelanov A., Zhalilo A. Mapping the regional ionospheric TEC using observations of GNSS stations of Ukraine // TCSET'2014: thesis. – Lviv, 2014 – P. 792.
- Bisnath S., Gao Y. Precise point positioning: a powerful technique with a promising future / GPS World. – 2009. – P. 43–50.
- Calle Calle J. D., Rodríguez Pérez I., Cueto Santamaría M., et al. Using LEO GNSS data for precise calibration of space HW biases // Proc. 25th Int. Technical meeting of the satellite division of the Institute of Navigation. — Nashville TN, 2012. — P. 2249—2258.
- Colombo Oscar L. Resolving carrier-phase ambiguities on the fly, at more than 100 km from nearest reference site, With The help of ionospheric tomography // ION GPS

1999: Proc. 12th Int. technical meeting of the satellite division of the Institute of Navigation. — Nashville, TN., 1999. — P. 1635—1642.

- Fedrizzi M., Langley R. B., Komjathy A., et al. The low-latitude ionosphere: Monitoring its behaviour with GPS // Proc. 14th Int. Technical meeting of the satellite division of the Institute of Navigation (ION GPS 2001). — Salt Lake City, UT., 2001. — P. 2468—2475.
- Hernandez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Colombo O. L. Application of ionospheric tomography to real-time GPS carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400– 1000 km and with high geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. – 2000. – 27, N 13. – P. 2009–2012.
- Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. – AES-23. – P. 325–331.
- Komjathy A. Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system: Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report N 188. — University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1997. — 248 p.
- Leick A. GPS Satellite Surveying: 3-rd ed. New York: John Wiley, 2003. – 464 p.
- Liu J., Chen R., Kuusniemi H., et al. Mapping the regional ionospheric TEC using a spherical cap harmonic model and IGS products in high latitudes and the arctic region // Proc. IAIN 2009 World Congress. — Stockholm, Sweden, 2009. — Mode of access.
- Liu J., Chen R., Kuusniemi H., et al. A Preliminary study on mapping the regional ionospheric TEC using a spherical cap harmonic model in high latitudes and the arctic region // J. Global Posit. System. – 2010. – 9, N 1. – P. 22–32.
- *Rizos C.* Principles and practice of GPS surveying. School of engineering. The University of New South Wales, Australia, 1999. 555 p.
- Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system: Ph. D. dissertation. — Astronomisches Institut der Universität Bern, 1999. — 228 p.
- 22. Sparks L., Komjathy A., Mannucci A. J. Estimating SBAS ionospheric delays without grids: The conical domain approach // ION NTM 2004: Proc. National technical meeting of the Institute of Navigation. San Diego, CA, 2004. P. 530—541.

Стаття надійшла до редакції 01.12.15

О. О. Жаліло¹, А. І. Ємець¹, Є. А. Безсонов², І. В. Діцький², Є. М. Занімонський³

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ
² Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України ³ Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

ПОБУДОВА І ВАЛІДАЦІЯ РЕГІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВМІСТУ ІОНОСФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОЧАСТОТНИХ ФАЗОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У МЕРЕЖАХ ПЕРМАНЕНТНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ

Викладено результати побудови, оптимізації і валідації регіональної двовимірної моделі повного електронного змісту (ПЕС) іоносфери. Моделювання грунтується на використанні високоточних однозначних фазових «безгеометричних» ГНСС-спостережень у мережі перманентних референцних станцій і здійсненні спільного МНКоцінювання параметрів моделі і невідомих фазових зміщень. Показано, що запропонована модель дозволяє на 65...80 % точніше виконувати абсолютне і диференціальне позиціонування порівняно з відомою моделлю GIM IONEX (IGS).

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), перманентна референцна станція, спостереження, моделювання, повний електронний вміст іоносфери.

A. A. Zhalilo¹, A. I. Yemets¹, Ev. A. Bessonov², I. V. Ditskiy², Ye. M. Zanimonskiy³

¹ Main Astronomical Observatory

of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv ² Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science of Ukraine ³ Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

CONSTRUCTION AND VALIDATION OF THE REGIONAL MODEL OF IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT USING DUAL-FREQUENCY CARRIER-PHASE OBSERVATIONS OF NETWORKS OF PERMANENT GNSS-STATIONS

The results of construction, optimization and validation of the regional two-dimensional model of total electron content (TEC) of ionosphere are presented. Modeling is based on the use of high-precision non-ambiguous carrier phase «geometry-free» GNSS observations of permanent reference station networks and provided by the of joint LSM-estimation of model parameters and unknown phase biases. It is shown that the proposed model allows up to 65...80 % more accurately executing of absolute and differential positioning in comparison with the known GIM IONEX (IGS) model.

Key words: global navigation satellite systems (GNSS), permanent reference station, observations, modeling, total electron content (TEC) of ionosphere.