

УДК 528.2:629.78

О. А. Хода

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ЦЕНТР АНАЛИЗА ГНСС-ДАННЫХ ГАО НАН УКРАИНЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1400–1631

В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины были обработаны наблюдения ГНСС-спутников на перманентных станциях, расположенных в Украине и в Восточной Европе, для GPS-недель 1400–1631. Обработка выполнена с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результате получены оценки координат ГНСС-станций в системе координат IGS05 и оценки зенитных тропосферных задержек для всех станций. Полученные решения соответствуют по качеству комбинированным решениям Европейской перманентной ГНСС-сети.

Ключевые слова: ГНСС, ITRF, IGS05, координаты станций, зенитные тропосферные задержки.

В декабре 2003 г. в Главной астрономической обсерватории (ГАО) НАН Украины началась регулярная обработка данных наблюдений GPS-спутников на перманентных станциях, расположенных в Украине и в соседних странах. Обработка проводилась с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» согласно действующим на то время требованиям Европейской ГНСС-сети (EPN). Были обработаны данные для GPS-недель 1236–1399 (14 сентября 2003 г. — 4 ноября 2006 г.) [1–3].

Начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.) Международная ГНСС-служба (IGS) ввела новые требования для обработки данных с перманентных ГНСС-станций, эти же требования приняла и Европейская перманентная ГНСС-сеть. Основные изменения:

- использование системы координат IGS05 (IGS-реализации системы координат ITRF2005 [6]);
- использование абсолютных моделей вариаций фазовых центров комбинаций ГНСС-антенна — купол (вместо относительных);
- использование модели океанической нагрузки FES2004.

Для продолжения регулярной обработки ГНСС-данных согласно новым требованиям ГАО НАН Украины обновила версию программного комплекса «Bernese GPS Software» до версии 5.0.

Программный комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» [7] поставляется в виде исходных кодов. Тексты программ написаны на языках программирования «Fortran 90», «Fortran 77» и C++, одна подпрограмма написана на языке С. Для компиляции программ комплекса использовался свободный компилятор «g95» для операционной системы «Linux».

Сеть станций была расширена. В обработку были включены наблюдения на новых украинских станциях «Кацивели» (KTVL), «Прилуки» (PRYL), «Смела» (SMLA) и «Харьков/ХНУРЭ» (SURE).

Перманентная GPS-станция «Харьков/ХНУРЭ» (SURE, номер DOMES: 15504M001) была установлена Харьковским национальным университетом радиоэлектроники 1 ноября 2006 г. Станция используется для учебных и научных целей. Регулярные наблюдения GPS-спутников на станции SURE начались 25 апреля 2007 г. Оборудование станции периодически

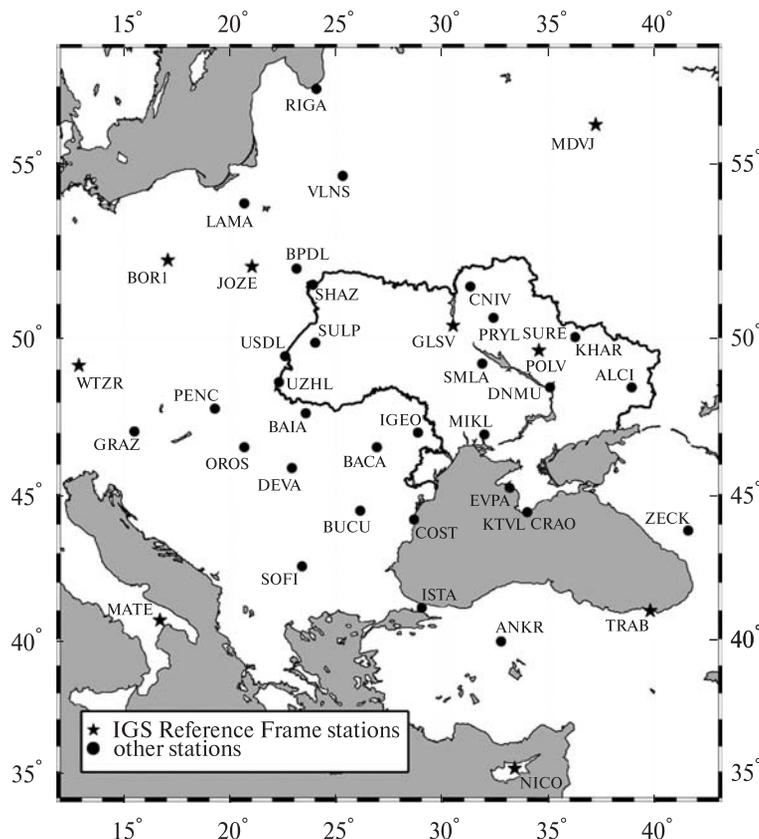


Рис. 1. Схема расположения ГНСС-станций

менялось, на конец GPS-недели 1631 станция «Харьков/ХНУРЭ» была оборудована комплектом аппаратуры фирмы «NovAtel Inc.» (Канада): GPS-приёмником «ProPak-LBplus» (код IGS: NOV OEM4-G2) и GPS-антенной GPS-702 (rev. 4). Антенный пост расположен на крыше корпуса одного из факультетов университета.

Перманентная ГНСС-станция «Смела» (SMLA, номер DOMES: 15503M001) была установлена ГАО НАН Украины 20 ноября 2008 г. на территории ГП «Оризон-Навигация» (г. Смела Черкасской обл.). В тот же день начались регулярные наблюдения ГНСС-спутников. Антенный пост расположен на крыше одного из корпусов предприятия. 1 ноября 2009 г. (день года 305, GPS-неделя 1556) перманентная ГНСС-станция «Смела» была включена в Европейскую перманентную ГНСС-сеть.

Перманентная ГНСС-станция «Кацивели» (KTVL, номер DOMES: 12337M003) была установ-

лена ГАО НАН Украины 14 сентября 2009 г. Станция расположена на территории Крымской лазерной обсерватории ГАО НАН Украины (АР Крым, Ялта, пгт. Кацивели). Антенный пост расположен на фундаменте разрушенного пункта полигонометрии второго класса рядом со зданием главного офиса обсерватории. Регулярные наблюдения ГНСС-спутников начаты в день установки станции. 13 июня 2010 г. (день года 164, GPS-неделя 1588) станция «Кацивели» была включена в Европейскую перманентную ГНСС-сеть.

Перманентная ГНСС-станция «Прилуки» (PRYL) была установлена 9 октября 2008 г. совместными усилиями ГАО НАН Украины и Черниговского государственного института экономики и управления. Станция расположена в здании Прилуцкой государственной районной администрации, антенный пост расположен на крыше здания. Регулярные наблюдения ГНСС-спутников начаты 16 октября 2008 г.



Рис. 2. Диаграмма наблюдений на ГНСС-станциях

Все новые станции ГАО НАН Украины (KTVL, PRYL и SMLA) были оборудованы ГНСС-приёмниками DL-V3 (код IGS: NOV OEMV3) и ГНСС-антеннами GPS-702GG (код IGS: NOV702GG) фирмы «NovAtel Inc.».

Для лучшего задания референсной системы координат в сеть были добавлены четыре станции из списка IGS Reference Frame (JOZE, MATE, NICO, WTZR). Также дополнительно были включены в сеть и шесть станций из соседних с Украиной стран: ANKR, BPDF, IGEO, SOFI, OROS и USDL. Наблюдения на станциях «Клайпеда» (KLPD) и «Обнинск» (MOBN) были исключены из обработки. Таким образом, были обработаны наблюдения на 41 станции, расположенных в Восточной Европе. Схема расположения станций показана на рис. 1, полный список станций представлен в табл. 1.

Точные эфемериды ГНСС-спутников представлялись в системе координат IGS05 для GPS-недель 1400—1631 (5 ноября 2006 г. — 16 апреля 2011 г.). Все доступные ГНСС-наблюдения на станциях сети были включены в обработку. Диаграмма наблюдений на станциях представлена на рис. 2.

Обработка была выполнена с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» согласно вступившим в действие новым требованиям Европейской перманентной ГНСС-сети. Согласно требованиям обрабатывались наблюдения не только GPS-, но и ГЛОНАСС-спутников. Если на GPS-неделе 1400 только три станции проводили наблюдения ГЛОНАСС-спутников (MDVJ, SOFI и WTZR), то к концу обрабатываемого периода количество таких станций достигло 20 (см. табл. 1).

Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» (отсутствие общего смещения) на координаты станций из списка IGS Reference Frame (BOR1, GLSV, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, POLV, TRAB и WTZR). Априорные значения координат и скоростей этих станций были взяты из каталога IGS05. Для остальных станций в качестве априорных использовались координаты из каталога IGS05 или из решения для предыдущей сессии (для станций, не включённых в каталог). Для новых станций априорные координаты брались из заголовков RINEX-файлов и уточнялись в процессе предварительной обработки.

Таблиця 1. Список постійних ГНСС-станцій

Ідентифікатор	Номер DOMES	Станція	Страна	Міжнародні мережі	ГНСС
ALCI	12371S001	Алчевськ	Україна	EPN	GPS
ANKR	20805M002	Анкара	Турція	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
BACA	11405M001	Бакэу	Румунія	EPN	GPS
BAIA	11406M001	Бая-Маре	Румунія	EPN	GPS
BORI	12205M002	Борувець	Польща	IGS, EPN	GPS
BPDFL	12223M001	Бяла-Подляська	Польща	EPN	GPS+ГЛОНАСС
BUCU	11401M001	Бухарест	Румунія	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
CNIV	15501M001	Чернігів	Україна	EPN	GPS
COST	11407M001	Констанца	Румунія	EPN	GPS
CRAO	12337M002	Симеїз	Україна	IGS, MGN	GPS
DEVA	11408M001	Дева	Румунія	EPN	GPS
DNMU	12369M001	Дніпропетровськ	Україна	—	GPS
EVPA	12344M001	Євпаторія	Україна	EPN	GPS+ГЛОНАСС
GLSV	12356M001	Київ/Голосеєво	Україна	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
GRAZ	11001M002	Грац	Австрія	IGS, EPN, ECGN	GPS+ГЛОНАСС
IGEO	15101M001	Кишинів	Молдова	EPN	GPS
ISTA	20807M001	Стамбул	Турція	IGS, EPN	GPS
JOZE	12204M001	Юзефослав	Польща	IGS, EPN	GPS
KHAR	12314M001	Харків	Україна	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
KTVL	12337M003	Кацивели	Україна	EPN	GPS+ГЛОНАСС
LAMA	12209M001	Лямкувко	Польща	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
MATE	12734M008	Матера	Італія	IGS, EPN, TOS	GPS+ГЛОНАСС
MDVJ	12309M005	Менделеево	Росія	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
MIKL	12335M001	Николаєв	Україна	IGS, EPN	GPS
NICO	14302M001	Нікосія	Кіпр	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
OROS	11207M001	Орошхаза	Венгрія	EPN	GPS+ГЛОНАСС
PENC	11206M006	Пенц	Венгрія	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
POLV	12336M001	Полтава	Україна	IGS,	GPS
PRYL	15502M001	Прилуки	Україна	—	GPS+ГЛОНАСС
RIGA	12302M002	Рига	Латвія	IGS, EPN, ECGN	GPS
SHAZ	12370M001	Шацьк	Україна	—	GPS
SMLA	15503M001	Смела	Україна	EPN	GPS+ГЛОНАСС
SOFI	11101M002	Софія	Болгарія	IGS, EPN, ECGN	GPS+ГЛОНАСС
SULP	12366M001	Львів	Україна	IGS, EPN	GPS
SURE	15504M001	Харків/ХНУРЕ	Україна	—	GPS
TRAB	20808M001	Трабзон	Турція	IGS, EPN	GPS
USDL	12229M001	Устшики-Дольне	Польща	EPN	GPS+ГЛОНАСС
UZHL	12301M001	Ужгород	Україна	IGS, EPN	GPS+ГЛОНАСС
VLNS	10801M001	Вільнюс	Литва	EPN, ECGN	GPS
WTZR	14201M010	Ветцель	Німеччина	IGS, EPN, ECGN, TOS	GPS+ГЛОНАСС
ZECK	12351M001	Зеленчукська	Росія	IGS, EPN	GPS

В качестве исходных данных служили:

- наблюдения GPS- и ГЛОНАСС-спутников, зафиксированные на перманентных станциях сети (в формате RINEX);
- комбинированные точные эфемериды GPS- и ГЛОНАСС-спутников, предоставляемые IGS (в формате SP3);
- параметры вращения Земли, полученные IGS и согласующиеся с точными эфемеридами ГНСС-спутников;
- солнечно-лунные эфемериды DE200, предоставляемые Лабораторией реактивного движения (JPL);
- DCB-файлы, предоставляемые Центром определения орбит в Европе (CODE), содержащие оценки разностей кодовых наблюдений для каждого спутника;
- глобальная модель ионосферы, предоставляемая CODE.

В табл. 2 приведены основные использованные модели и априорные данные для данной обработки и отличия от предыдущего варианта обработки.

Процесс получения решения для каждой GPS-недели состоял из четырёх основных этапов:

- предварительная обработка суточных сессий наблюдений (проверка качества наблюдений, преобразование входных данных во внутренние форматы, формирование баз, предварительная обработка кодовых и фазовых наблюдений, фиксирование фазовых неоднозначностей с помощью методики QIF [8], формирование файлов нормальных уравнений для суточной сессии);
- получение оценок координат для отдельного дня наблюдений (уравнивание полученных файлов нормальных уравнений, получение финальных нормальных уравнений и SINEX-файлов для суточной сессии);
- получение оценок координат для отдельной недели (уравнивание суточных файлов нормальных уравнений, получение SINEX-файла для данной недели);
- получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Подробнее схема обработки описана в работе [4], диаграммы получений суточных и недельных решений показаны в работе [5, рис. 2, 3].

В результате были получены суточные и недельные оценки координат станций сети, а также

Таблица 2. Основные модели и априорные данные для предыдущего и текущего вариантов решений

	Решение для GPS-неделя 1236—1399	Решение для GPS-неделя 1400—1631
Версия программного комплекса «Bernese GPS Software»	4.2	5.0
ГНСС-спутники	GPS	GPS+ГЛОНАСС
Система координат точных эфемерид ГНСС-спутников, априорных координат и скоростей станций	IGS00b	IGS05
Задание системы координат	Жёсткие ограничения (0.1 мм) на координаты станции GLSV	Ограничение «No-net translation» на координаты станций из списка IGS Reference Frame
Модель океанической нагрузки	GOT00.2_PP	FES2004
Модель ионосферы	Формируется во время обработки	CODE
Априорная модель тропосферы	Не используется	DRY_NIELL
Учет азимутальной асимметрии локальной тропосферы	Нет	Да
Модели калибровки фазовых центров комбинаций антенна — купол	Относительные	Абсолютные
Минимальный угол места GPS-спутников	10°	3°

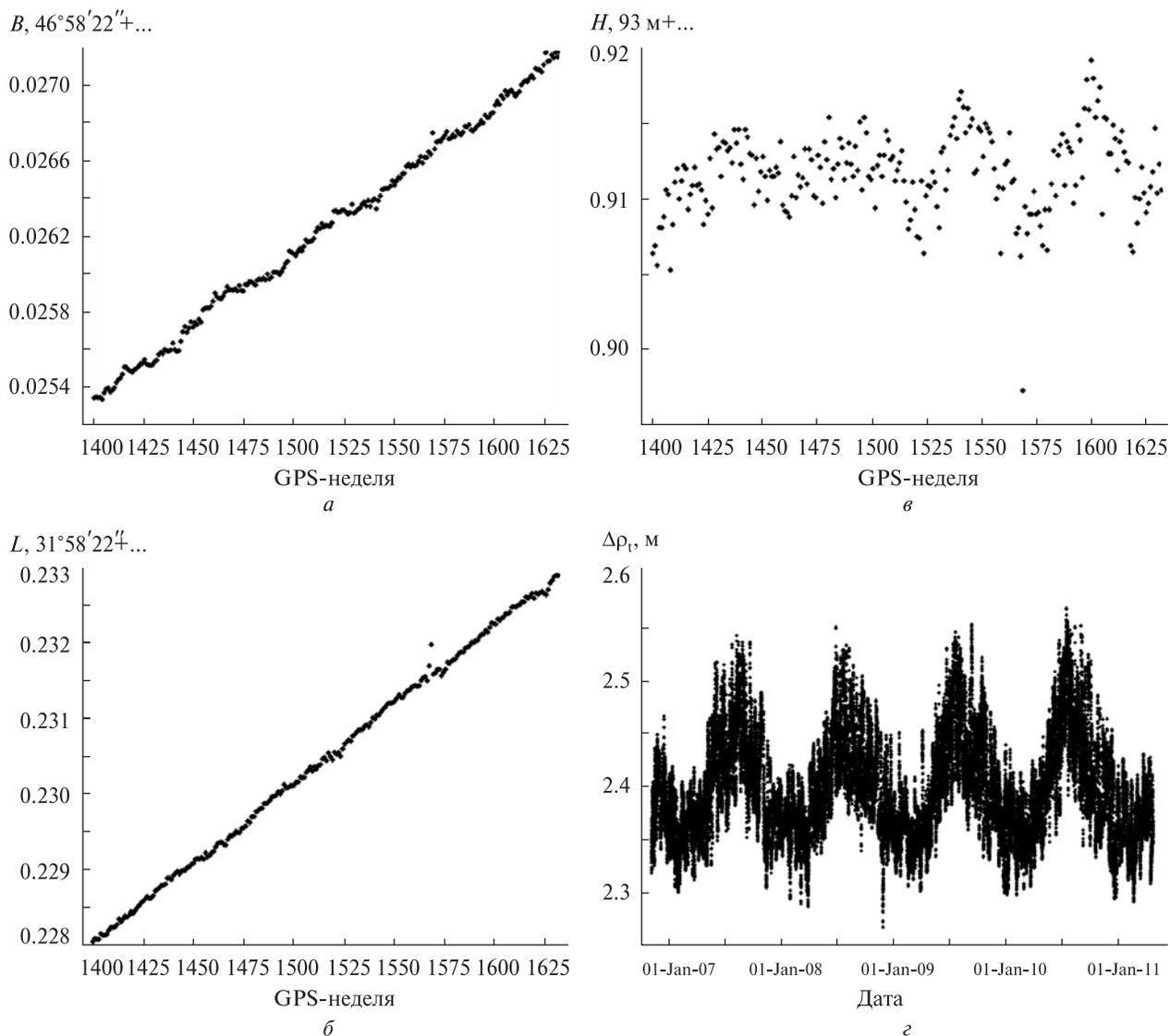


Рис. 3. Изменения координат (*a* — широты, *б* — долготы, *в* — высоты) и значений зенитной тропосферной задержки (*г*) для станции «Николаев» (MIKL)

значения зенитной тропосферной рефракции для станций.

В качестве примера на рис. 3 показаны изменения значений координат и зенитной тропосферной задержки для станции «Николаев» (MIKL). Все результаты (в формате SINEX) и их графические представления размещены в свободном доступе на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGS05/>).

Характеристикой точности полученных оценок координат может служить повторяемость

значений составляющих координат ГНСС-станций, т. е. остатки после преобразований Гельмерта между суточными и недельным решениями. На рис. 4 показана средняя повторяемость значений составляющих координат для каждой станции. Видно, что все значения для горизонтальных составляющих координат меньше 1.5 мм, а подавляющее большинство значений вертикальной составляющей — меньше 3.0 мм (лишь для шести станций эти значения находятся в диапазоне 3.0–4.0 мм).

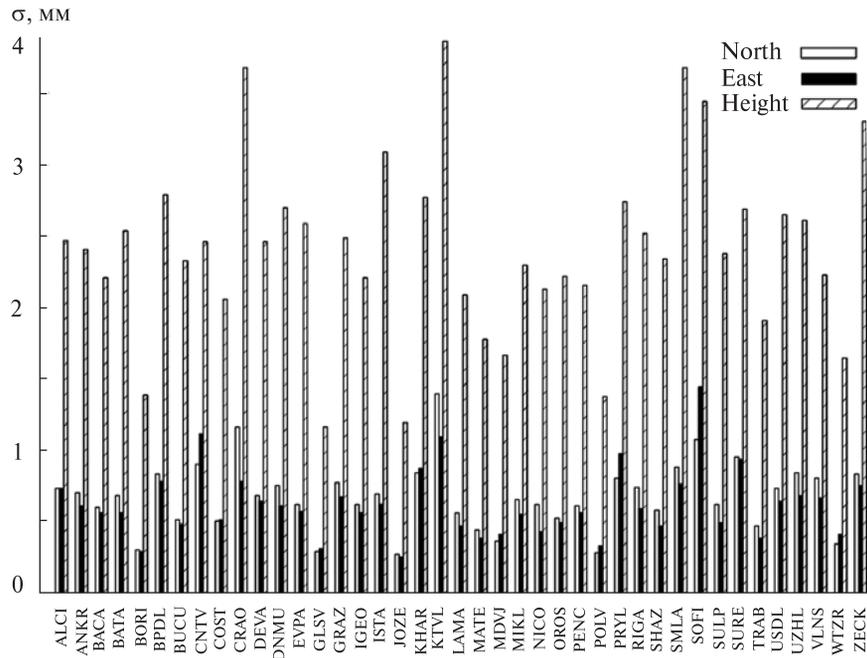


Рис. 4. Средняя повторяемость значений составляющих координат ГНСС-станций

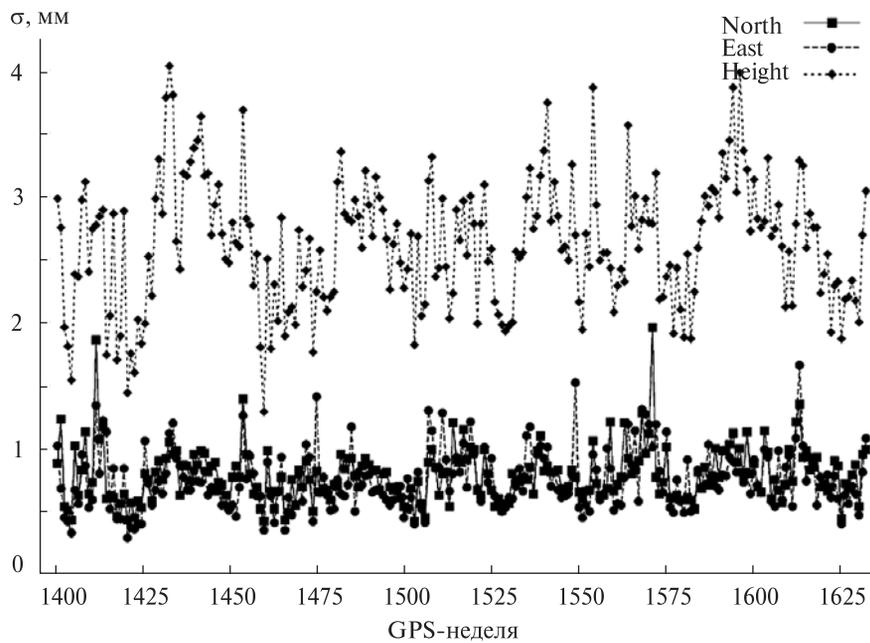


Рис. 5. Изменения средней повторяемости значений составляющих координат ГНСС-станций

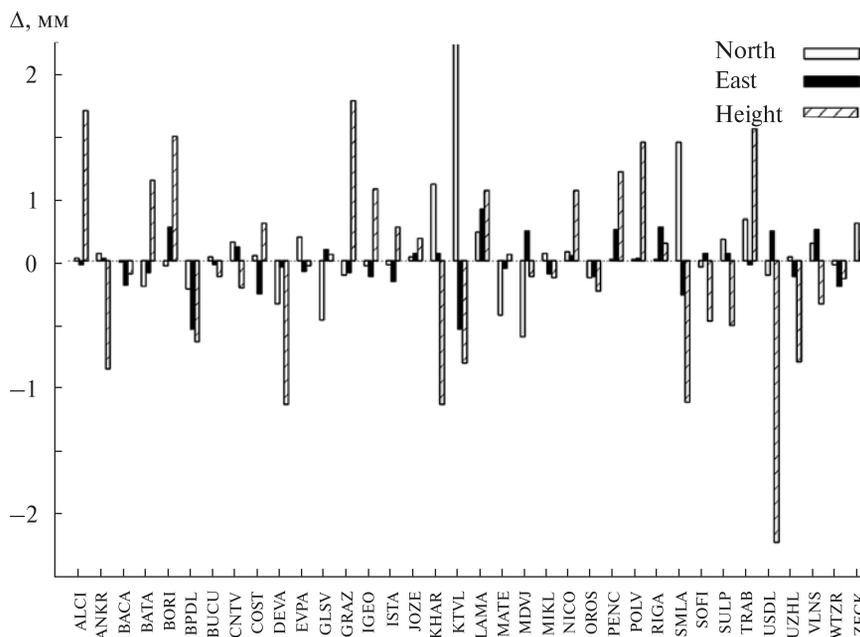


Рис. 6. Средние значения остатков составляющих координат ГНСС-станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN

Изменения средней повторяемости значений составляющих координат станций для каждой недели представлено на рис. 5. Можно сказать, что значения для горизонтальных составляющих координат в основном меньше 1.5 мм (немногие значения лежат в диапазоне 1.5–2.0 мм), значения для вертикальной составляющей в основном меньше 3.5 мм (иногда достигая приблизительно 4.0 мм).

Приведённые выше результаты позволяют утверждать о высокой точности полученных оценок координат станций.

Почти все ГНСС-станции сети (кроме украинских станций CRAO, DNMU, PRYL, SHAZ и SURE) входят в Европейскую перманентную ГНСС-сеть, поэтому возможно сравнить решения, полученные в ГАО НАН Украины, с комбинированными решениями EPN. Диапазоны полученных параметров преобразования Гельмерта между решениями представлены в табл. 3. Наличие сдвига точки начала отсчёта вполне объяснимо, ведь сеть EPN покрывает гораздо большую территорию, а для задания самой системы коор-

динат используется гораздо больше референсных станций. Значения углов вращения вокруг осей и масштабного множителя незначительны. Средние значения остатков составляющих координат общих станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN показаны на рис. 6. Представленные результаты позволяют утверждать, что полученные решения Центра ана-

Таблица 3. Диапазоны параметров преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями Европейской перманентной ГНСС-сети

Параметр	Диапазон значений
Сдвиг по оси X, мм	от –13.0 до 14.1
Сдвиг по оси Y, мм	от –22.3 до 16.5
Сдвиг по оси Z, мм	от –9.4 до 13.9
Вращение вокруг оси X, мсд	от –0.61 до 0.52
Вращение вокруг оси Y, мсд	от –0.47 до 0.37
Вращение вокруг оси Z, мсд	от –0.45 до 0.48
Масштабный множитель, 10^{-9}	от –0.6 до 1.2

лиза ГНСС-данных ГАО НАН Украины соответствуют по качеству комбинированным решениям Европейской перманентной ГНСС-сети.

Таким образом, в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины из обработки наблюдений, выполненных на перманентных ГНСС-станциях Украины и Восточной Европы, для GPS-недель 1400—1631 получены оценки координат станций сети в системе координат IGS05, а также оценки зенитных тропосферных задержек для всех станций сети. Решения ГАО НАН Украины хорошо согласуются с комбинированными решениями Европейской перманентной ГНСС-сети.

Работа частично выполнена в рамках научно-исследовательских работ «Наукові основи, програмно-технічне забезпечення функціонування Української постійнодіючої ГНСС-мережі для досліджень регіональної та локальної геодинаміки» (2008—2010 гг.) в рамках государственной целевой программы «Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)» и «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» (2011 г.) в рамках целевой комплексной программы фундаментальных исследований НАН Украины «Дослідження сонячно-земних зв'язків та їх впливу на функціонування геосистем (ГЕОКОСМОС)».

1. Хода О. А. Центр анализа GPS-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPS-недель 1236—1399 // Кинематика и физика небес. тел. — 2010. — 26, № 6. — С. 56—67.
2. Хода О. А. Определение координат украинских перманентных GPS-станций по данным наблюдений для GPS-недель 1236—1399 // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — 27, № 1. — С. 25—39.
3. Хода О. А. Определение зенитной тропосферной рефракции на украинских перманентных GPS-станциях по данным наблюдений для GPS-недель 1236—1399 // Кинематика и физика небес. тел. — 2011. — 27, № 2. — С. 3—7.
4. Хода О. А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 45—53.
5. Хода О. А. Обработка эталонной тестовой кампании EPN в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 59—65.

6. Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., et al. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters // J. Geophys. Res. — 2007. — 112B, N 9. — DOI: 10.1029/2007JB004949.
7. Bernese GPS Software Version 5.0 / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
8. Mervart L. Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System // Inauguraldissertation der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. — 1995. — 155 p.

Стаття надійшла до редакції 05.12.14

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України, Київ

ЦЕНТР АНАЛІЗУ ГНСС-ДАНИХ ГАО НАН УКРАЇНИ: РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 1400—1631

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було оброблено спостереження ГНСС-супутників на перманентних станціях, розташованих в Україні та в Східній Європі, для GPS-тижнів 1400—1631. Обробку було виконано за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результаті отримано оцінки координат ГНСС-станцій у системі координат IGS05 та оцінки зенітних тропосферних затримок для всіх станцій. Отримані розв'язки за якістю відповідають комбінованим розв'язкам Європейської перманентної ГНСС-мережі.

Ключові слова: ГНСС, ITRF, IGS05, координати станцій, зенітні тропосферні затримки.

О. А. Khoda

Main Astronomical Observatory
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

GNSS DATA ANALYSIS CENTRE OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY NAS OF UKRAINE: RESULTS OF OBSERVATIONS PROCESSING FOR GPS WEEKS 1400—1631

Observations of GNSS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe for GPS weeks 1400—1631 were processed in GNSS Data Analysis Centre of the Main Astronomical Observatory NAS of Ukraine. The processing was carried out with Bernese GPS Software ver. 5.0. As result the estimates of stations coordinates in the IGS05 reference frame and the estimates of zenith tropospheric delays for all stations are defined. The obtained solutions are in good agreement with the combined solutions of the EUREF Permanent GNSS Network.

Key words: GNSS, ITRF, IGS05, stations coordinates, zenith tropospheric delays.