

УДК 528.2:629.78

О. А. Хода

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКИХ ПЕРМАНЕНТНЫХ ГНСС-СТАНЦИЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1632—1708

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 1632—1708. Обработка была выполнена с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результате получены оценки координат ГНСС-станций в системе координат IGS08 и оценки зенитных тропосферных задержек для всех станций, в том числе и для новых станций украинских коммерческих ГНСС-сетей «TNT-TPI GNSS Network» и «System.NET». Полученные решения соответствуют по качеству комбинированным решениям Европейской перманентной ГНСС-сети.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), Международная земная система координат (ITRF), IGS08, координаты станций, зенитные тропосферные задержки.

В мае 2010 г. Центр Международной референсной земной системы координат (ITRS Centre) Международной службы вращения Земли и референсных систем (IERS) объявил о выпуске новой реализации Международной референсной земной системы координат ITRF2008 [4], которая основывается на результатах переобработки наблюдений, выполненных с помощью четырёх техник космической геодезии (одна из них — GPS). При переобработке GPS-наблюдений для создания ITRF2008 использовались абсолютные калибровки комбинаций антенна-купол согласно модели igs05.atx [8]. Для согласования с новой моделью калибровок igs08.atx [7] Международная ГНСС-служба (IGS) ввела свою реализацию системы координат ITRF2008 — IGS08 [6]. IGS08 задаётся координатами 232 перманентных ГНСС-станций. Координаты 65 стан-

ций были уточнены для согласования с моделью калибровок igs08.atx, координаты остальных 167 станций совпадают с координатами из каталога ITRF2008. Несмотря на эти отличия в координатах, значения параметров преобразования Гельмерта между системами координат IGS08 и ITRF2008 считаются равными нулю.

Все продукты Международной ГНСС-службы, в том числе точные эфемериды GPS- и ГЛОНАСС-спутников, координаты и скорости перманентных ГНСС-станций, для GPS-недель 1632—1708 (17 апреля 2011 г. — 6 октября 2012 г.) базировались на системе координат IGS08.

В Центре анализа ГНСС-данных Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО) для этого периода проведена регулярная обработка данных наблюдений ГНСС-спутников на перманентных станциях, расположенных в Украине и в Восточной Европе, с целью определить координаты станций в системе координат IGS08.

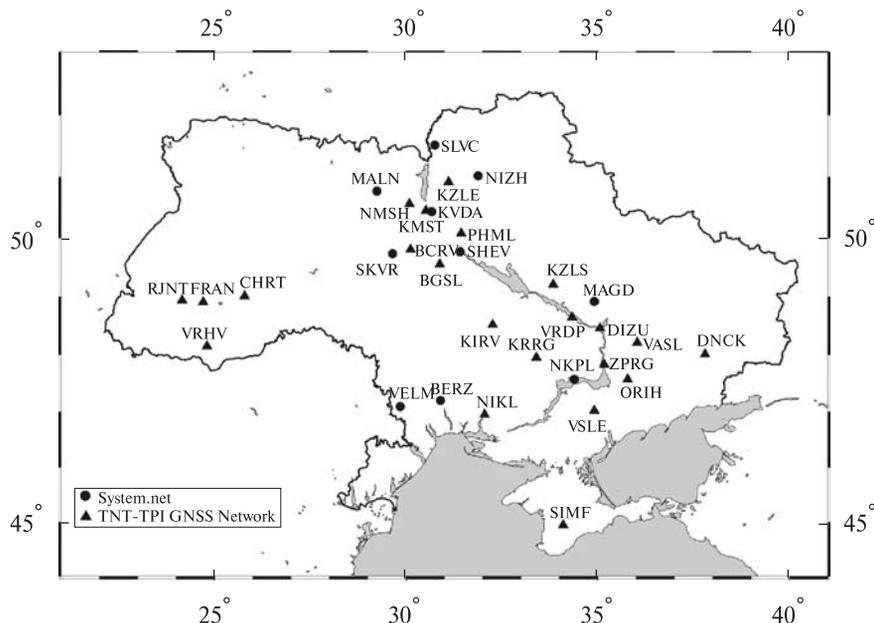


Рис. 2. Схема расположения перманентных ГНСС-станций сетей «TNT-TPI GNSS Network» и «System.NET»

станций украинских коммерческих ГНСС-сетей «TNT-TPI GNSS Network» и «System.NET».

Перманентная сеть «TNT-TPI GNSS Network» (<https://net.tnt-tpi.com/page>) создана ООО ТНТ-ТПИ (г. Днепропетровск), эксклюзивным дистрибьютором корпорации «Торсон» (Япония) в Украине. Станции сети расположены в основном в Среднем и Нижнем Поднепровье. По состоянию на 6 октября 2012 г. в сеть входило 22 станции. Перечень станций и их оборудование показаны в табл. 1. Кроме файлов ГНСС-наблюдений, на станциях сети пользователям предоставляется доступ к корректирующей информации в формате RTCM по протоколу NTRIP.

Перманентная сеть «System.NET» (<http://systemnet.com.ua>), созданная ЧАО «Систем Солюшнс» (г. Киев), начала работу 19 декабря 2011 г. До 6 октября 2012 г. было установлено десять новых станций (в скобках после идентификаторов указаны номера DOMES): «Березовка» (BERZ, 15511M001), «Канев» (SHEV, 15515M001), «Киев/Дарница» (KVDA, 15506M001), «Магдалиновка» (MAGD, 15512M001), «Малин» (MALN, 15507M001), «Нежин» (NIZH, 15508M001), «Никополь» (NKPL, 15513M001), «Сквира» (SKVR,

15509M001), «Славутич» (SLVC, 15510M001), «Великая Михайловка» (VELM, 15514M001). Все станции оборудованы ГНСС-приёмниками «LEICA GR10» и антеннами «LEIAR10» без купола. Такое же оборудование было установлено на станции «Днепропетровск» (DNMU). Станция DNMU возобновила свою работу 11 июня 2012 г. и также была включена в сеть «System.NET». Через NTRIP-сервер сети потребители могут получить доступ к сформированным разными методами RTK-поправкам в различных форматах.

Таким образом, общее количество станций в сети составило 72. Диаграмма наблюдений на станциях представлена на рис. 3.

ГНСС-наблюдения на всех станциях сети были обработаны в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [5] согласно действовавшим в тот период требованиям Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN). Обработка была выполнена в следующей последовательности:

- предварительная обработка суточных сессий наблюдений;

Таблица 1. Перманентные станции сети «TNT-TPI GNSS Network»

Станция (номер DOMES)	Расположение	Приёмник	Антенна	Купол
BCRV	г. Белая Церковь	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
BGSL	г. Бобуслав (Киевская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
CHRT	г. Чертков	TPS HGGDT	TPSPG_A1	TPSD
DIZU	г. Днепропетровск	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
DNCK	г. Донецк	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (с 15.12.2011 г.)
FRAN	г. Ивано-Франковск	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
KIRV	г. Кировоград	TPS GB-500	TPSPG_A1	NONE; TPSD (с 25.12.2001 г.)
KMST (12315M001)	г. Киев (Метрострой)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
KRRG	г. Кривой Рог	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
KZLE	пгт. Козелец (Черниговская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
KZLS	пгт. Козельщина (Полтавская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
NIKL	г. Николаев	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (с 10.10.2011 г.)
NMSH	пгт. Немешаево (Киевская обл.)	TPS ODYSSEY_E	TPSCR3_GGD	CONE
ORIH	г. Орехов (Запорожская обл.)	TPS GB-500	TPSCR3_GGD	CONE
RHML	г. Переяслав-Хмельницкий	TPS GB-1000	TPSPG_A1	TPSD
RJNT	пгт. Рожнятов (Ивано-Франковская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
SIMF	г. Симферополь	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE; TPSD (с 13.09.2011 г.)
VASL	пгт. Васильковка (Днепропетровская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
VRDP	г. Верхнеднепровск (Днепропетровская обл.)	TPS GB-1000	TPSPG_A1	NONE
VRHV	пгт. Верховина (Ивано-Франковская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	NONE
VSLE	пгт. Весёлое (Запорожская обл.)	TPS GB-500	TPSPG_A1	TPSD
ZPRG	г. Запорожье	TPS GB-1000	TPSCR3_GGD	CONE

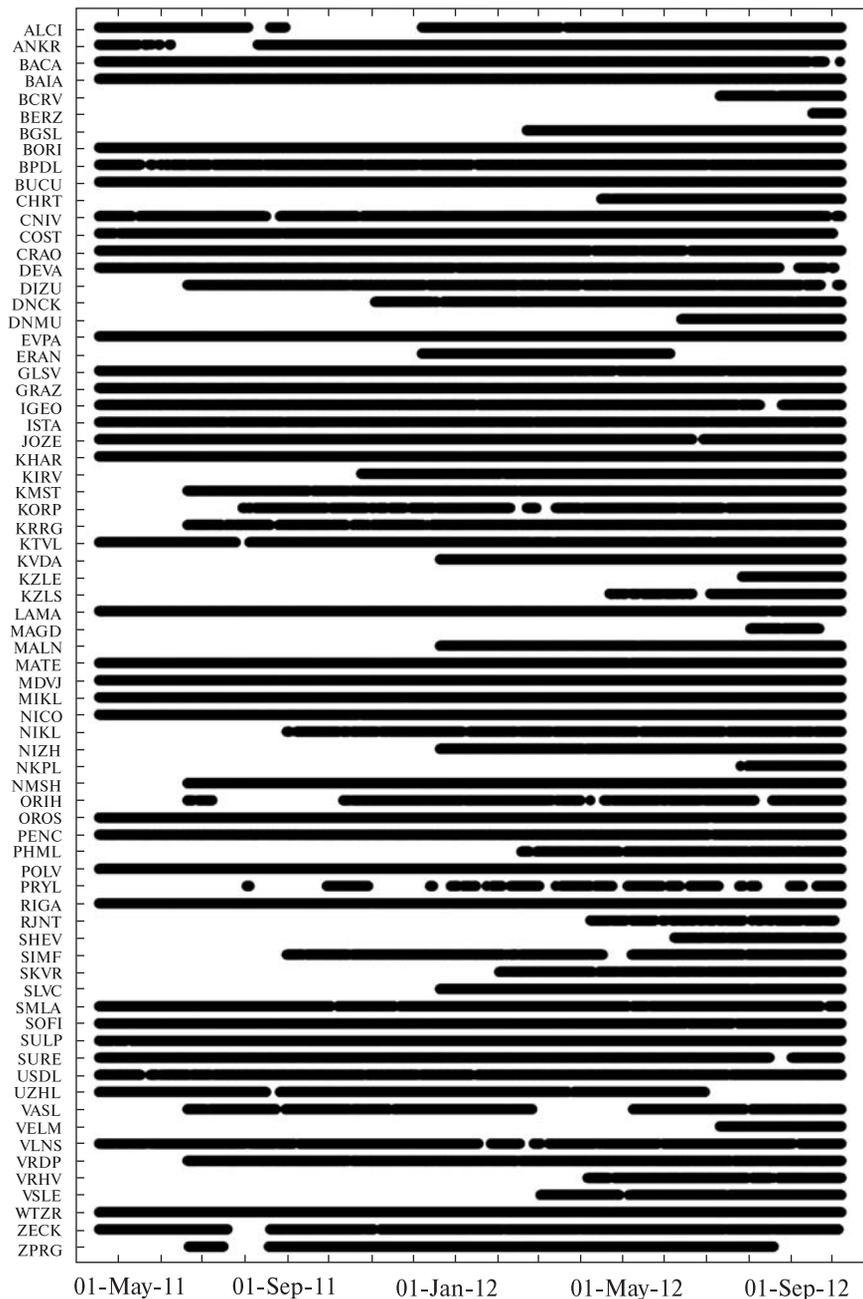


Рис. 3. Диаграмма наблюдений на ГНСС-станциях

- получение оценок координат для отдельного дня наблюдений;
- получение оценок координат для недели;
- получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Подробнее схема обработки описана в работе [1], диаграммы получения суточных и недельных решений показаны на рис. 2 и 3 в работе [2].

В качестве исходных данных служили:

- наблюдения ГНСС-спутников, зафиксированные на перманентных станциях сети (в формате RINEX);
- комбинированные точные эфемериды ГНСС-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.

Таблица 2. Координаты станций сети «TNT-TPI GNSS Network» для GPS-недели 1698 (система координат: IGS08, эпоха: 25 июля 2012 г. 12:00:00 время GPS)

Станция	X, м Y, м Z, м	Широта Долгота Высота, м	Станция	X, м Y, м Z, м	Широта Долгота Высота, м
BCRV	3568279.1915 2069742.5348 4848556.5367	49°47'56.573652" 30°06'55.520962" 215.5394	NMSH	3512101.9645 2035407.1179 4903425.2803	50°34'09.876446" 30°05'38.582977" 213.7265
BGSL	3558191.6813 2127363.6350 4831122.9384	49°33'24.372845" 30°52'27.350388" 220.5953	ORIH	3498158.4006 2520902.7852 4684212.1805	47°33'42.895133" 35°46'40.516215" 90.1583
CHRT	3773822.7546 1823739.7273 4791842.1164	49°00'52.739195" 25°47'33.528344" 284.3839	PHML	3498790.1817 2143181.4097 4867026.8625	50°03'28.303141" 31°29'22.281367" 134.8069
DIZU	3463259.2210 2431916.3165 4756188.1620	48°31'47.553347" 35°04'36.136033" 119.8705	RJNT	3830157.3290 1717771.5118 4786509.3324	48°56'24.921073" 24°09'20.020475" 413.9358
DNCK	3378275.6779 2621541.5966 4716841.9174	47°59'49.508405" 37°48'41.253730" 245.4846	SIMF	3740929.3762 2536824.3857 4485457.9415	44°58'22.454688" 34°08'32.088164" 338.5582
KIRV	3580644.7215 2257443.5310 4755337.2547	48°31'04.418299" 32°13'46.847341" 162.0081	VASL	3444688.8031 2503180.3165 4732794.6470	48°12'47.666362" 36°00'18.317074" 114.7511
KMST	3505800.8917 2066726.7518 4894884.8482	50°26'55.247621" 30°31'12.152915" 214.6071	VRDP	3486253.0402 2380263.3423 4765413.8475	48°39'20.065250" 34°19'24.878434" 93.8741
KRRG	3574076.8561 2356633.7513 4712152.9792	47°56'08.368253" 33°23'58.563209" 89.8677	VRHV	3871109.0077 1787573.3874 4728428.4873	48°08'54.379877" 24°47'10.373835" 703.3902
KZLE	3449803.3741 2082376.2324 4927625.9784	50°54'49.870791" 31°06'57.934593" 152.1926	VSLE	3570898.6426 2494321.7297 4643670.2546	47°01'26.884110" 34°56'05.380544" 103.9304
KZLS	3465825.1874 2325579.9485 4806876.6677	49°13'22.787448" 33°51'42.262123" 111.2026	ZPRG	3509633.5095 2459644.6785 4707985.2896	47°52'46.769228" 35°01'25.663059" 98.2011
NIKL	3697158.8762 2314682.9830 4637932.4525	46°56'54.059727" 32°02'58.120489" 117.0882	FRAN (GPS-неделя 1690, эпоха: 30 мая 2012 г. 12:00:00 время GPS)	3815148.3210 1755911.7252 4784539.5949	48°54'51.482334" 24°42'50.846138" 316.8461

Таблица 3. Координаты новых станций сети «System.NET» для GPS-недели 1706 (система координат: IGS08, эпоха: 19 сентября 2012 г. 12:00:00 время GPS)

Станция	X, м Y, м Z, м	Широта Долгота Высота, м	Станция	X, м Y, м Z, м	Широта Долгота Высота, м
BERZ	3725027.3694 2229185.6317 4657283.7340	47°12'15.703793" 30°53'51.957687" 73.5029	NKPL	3557707.9999 2435365.7111 4684639.1857	47°34'02.673670" 34°23'34.428382" 110.2541
KVDA	3501745.9208 2076988.1560 4893395.6427	50°25'41.325906" 30°40'24.319594" 170.0086	SHEV	3523606.8759 2151842.8458 4845424.6239	49°45'21.942959" 31°24'43.666654" 154.2941
MAGD	3443393.5287 2403366.5885 4784867.4517	48°55'14.297200" 34°54'49.229179" 137.3455	SKVR	3586943.0851 2045068.8678 4845326.8268	49°45'13.213564" 29°41'21.495529" 254.4540
MALN	3527322.0353 1974526.4471 4917238.8060	50°45'56.435147" 29°14'21.320925" 181.2847	SLVC	3418107.2278 2033545.6381 4969685.5606	51°31'01.276992" 30°44'59.355184" 184.5021
NIZH	3413641.3684 2123437.3514 4935250.5718	51°01'21.010418" 31°53'00.444209" 168.3639	VELM	3773429.3556 2165026.7796 4648637.4578	47°05'24.018017" 29°50'43.066968" 74.1873

Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» (отсутствие общего смещения) на координаты станций из списка IGS Reference Frame (ANKR, BOR1, BUCU, CRAO, GLSV, GRAZ, ISTA, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, POLV, RIGA, SOFI, UZHL, WTZR и ZECK). Априорные значения координат и скоростей этих станций были взя-

ты из каталога IGS08. Для остальных станций в качестве априорных использовались координаты из каталога IGS08 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.

В результате были получены суточные и недельные оценки координат станций сети, а также значения зенитной тропосферной рефракции для всех станций. Одной из главных целей данной обработки была оценка координат новых станций украинских коммерческих ГНСС-сетей. Координаты станций сети «TNT-TPI GNSS Network» для GPS-недели 1698 показаны в табл. 2. К сожалению, не было ни для одной недели, для которой были бы доступны наблюдения для всех станций этой сети. Поэтому координаты станции FRAN представлены для GPS-недели 1690. В табл. 3 показаны координаты новых станций сети «System.NET» для GPS-недели 1706. 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/IGS08/>).

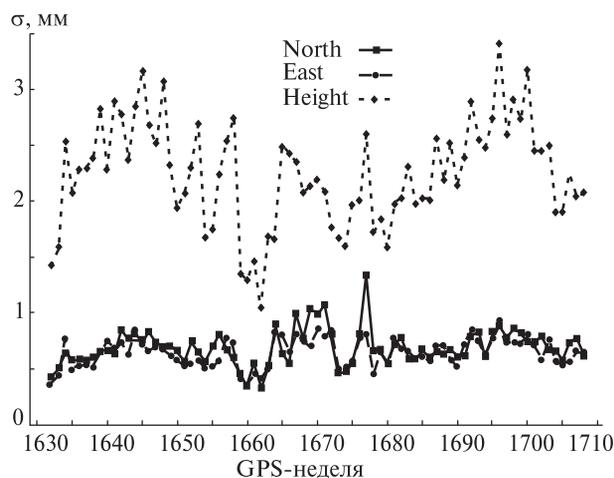


Рис. 4. Изменения средней повторяемости значений составляющих координат ГНСС-станций

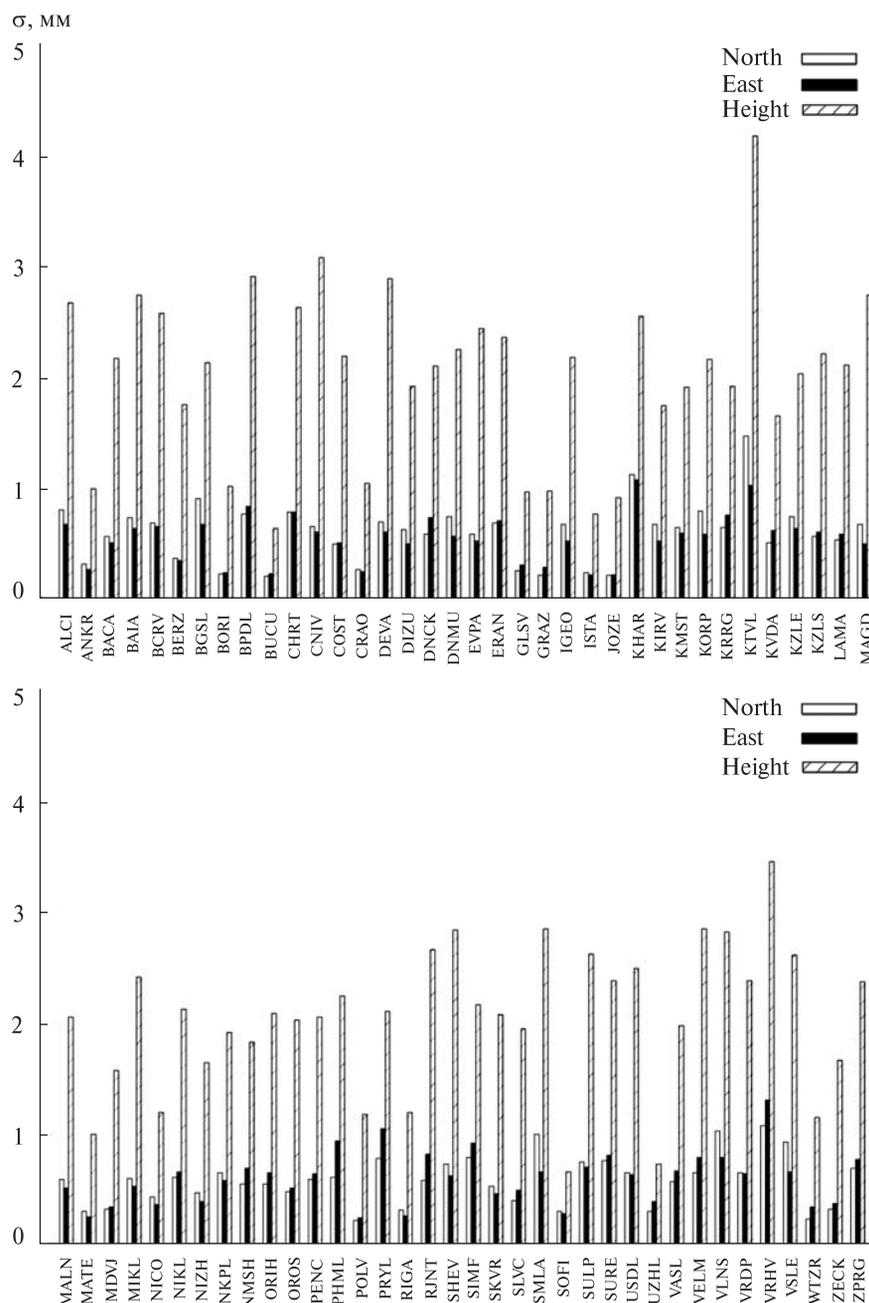


Рис. 5. Средняя повторяемость значений составляющих координат ГНСС-станций

Полученные из-за большого количества уравнений, а следовательно, и большого количества степеней свободы, субмиллиметровые средние квадратичные отклонения оценок координат ГНСС-станций не могут служить объективным критерием точности решений. Хорошим пока-

зателем точности оценок координат являются повторяемости значений составляющих координат станций, как средние для каждой недели (рис. 4), так и средние для каждой станции (рис. 5). Из рис. 4 видно, что значения для горизонтальных составляющих координат меньше

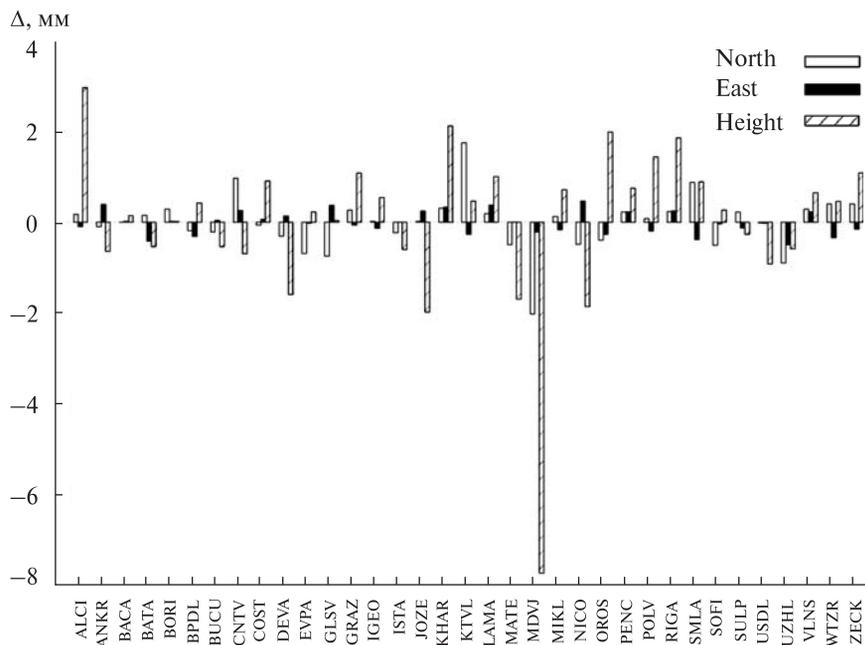


Рис. 6. Средние значения остатков составляющих координат ГНСС-станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN

1.4 мм, значения для вертикальной составляющей меньше 3.5 мм. Таким образом, можно утверждать о высокой точности полученных оценок координат станций.

35 станций «базовой» сети входят в Европейскую перманентную ГНСС-сеть (кроме украинских станций CRAO, DNMU, KORP, PRYL и SURE), поэтому возможно сравнить решения, полученные в ГАО НАН Украины, с комбинированными решениями EPN. Полученные значения параметров преобразования Гельмерта между решениями изменяются в следующих пределах:

- сдвиг — от -25.0 до 26.4 мм;
- вращение — от -0.67 до 0.96 мсд;
- масштабный множитель — от $-0.7 \cdot 10^{-9}$ до $0.5 \cdot 10^{-9}$.

Значения углов вращения вокруг осей и масштабного множителя незначительны. Сеть EPN покрывает гораздо большую территорию, чем сеть ГАО НАН Украины, и для задания системы координат IGS08 используется гораздо больше референсных станций.

Это различие в геометрии сетей естественно приводит к наличию сдвига точки начала отсчёта.

На рис. 6 показаны средние значения остатков составляющих координат общих станций после преобразования Гельмерта между решениями ГАО НАН Украины и комбинированными решениями EPN. Видно, что из общей картины выпадают значения остатков для станции «Менделеево» (MDVJ), находящейся на краю сети. Значения остатков для остальных станций находятся в пределах:

- для северной составляющей — от -0.89 до 1.75 мм;
- для восточной составляющей — от -0.49 до 0.47 мм;
- для высотной составляющей — от -1.97 до 2.96 мм.

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 1632—1708 получены высокоточные оценки координат станций сети в системе

координат IGS08, 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 научного задания «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» (2012 г.) в рамках Целевой комплексной программы научных космических исследований НАН Украины на 2012—2016 гг.

1. Хода О. А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+ГЛОНАСС // Космична наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 45—53.
2. Хода О. А. Обработка эталонной тестовой кампании EPN в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космична наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 59—65.
3. Хода О. А. Центр анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины: результаты обработки наблюдений для GPS-недель 1400—1631 // Космична наука і технологія. — 2015. — 21, № 2. — С. 56—64.
4. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // J. Geodesy. — 2011. — 85, N 8. — P. 457—473.
5. Bernese GPS Software Version 5.0 / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
6. Rebischung P., Griffiths J., Ray J., et al. IGS08: the IGS realization of ITRF2008 // GPS Solutions. — 2012. — 16, N 4. — P. 483—494.
7. Schmid R. IGS phase center model igs08.atx — Current status and future improvements [Электронный ресурс] // Presented at TUM Colloquium Satellite Navigation. — Munich, 2011. — Режим доступа: http://acc.igs.org/antennas/igs08-atx-status_TUM11.pdf
8. Schmid R., Gendt G., Steigenberger P., et al. Generation of igs05.atx — status quo [Электронный ресурс] // Presented at IGS Workshop 2006 «The International GNSS Service (IGS): Perspectives and Visions for 2010 and beyond». — Darmstadt, 2006. — Режим доступа: ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/resource/pubs/06_darmstadt/IGS%20Presentations%20PDF/10_2_Schmid.pdf

Стаття надійшла до редакції 23.01.15

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України, Київ

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКИХ ПЕРМАНЕНТНИХ ГНСС-СТАНЦІЙ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 1632—1708

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 1632—1708. Обробку було виконано за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0». В результаті отримано оцінки координат ГНСС-станцій у системі координат IGS08 та оцінки зенітних тропосферних затримок для всіх станцій, у тому числі і для нових станцій українських комерційних ГНСС-мереж «TNT-TPI GNSS Network» і «System.NET». Отримані розв'язки відповідають по якості комбінованим розв'язкам Європейської перманентної ГНСС-мережі.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), Міжнародна земна система координат (ITRF), IGS08, координати станцій, зенітні тропосферні затримки.

О. А. Khoda

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

ESTIMATION OF COORDINATES OF THE EASTERN EUROPEAN PERMANENT GNSS STATIONS USING OBSERVATION DATA FOR GPS WEEKS 1632—1708

Observations of GNSS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe for GPS weeks 1632—1708 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 a result, the estimation of stations coordinates in the IGS08 reference frame and the estimation of zenith tropospheric delays for all stations (including new stations of the Ukrainian commercial networks TNT-TPI GNSS Network and System. NET) are defined. The obtained solutions are in a good agreement with the combined solutions of the EUREF Permanent GNSS Network.

Key words: Global Navigation Satellite Systems (GNSS), International Terrestrial Reference Frame (ITRF), IGS08, stations coordinates, zenith tropospheric delays.