ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2012. Т. 18. № 4. С. 66–73.

УДК 528.2:629.78

М. В. Ищенко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕПРОЦЕССИНГА GPS-НАБЛЮДЕНИЙ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1236–1399

Спостереження GPS-супутників на перманентних станціях, які розташовані на території України та Східної Європи, було оброблено за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» з використанням нових моделей та методик обробки, впроваджених Міжнародною ГНСС-службою з GPS-тижня 1400. Визначено координати GPS-станцій для GPS-тижнів 1236–1399. Для оцінки якості отриманого розв'язку виконано порівняння з комбінованими розв'язками, що були отримані в ході кампаній репроцесингу Міжнародної ГНСС-служби та Європейської перманентної ГНСС-мережі.

На протяжении многих лет улучшались инструменты анализа и моделирования физики Земли, взаимосвязь между спутниковым сигналом, атмосферными рефракциями и ГНСС-оборудованием. К примеру, уменьшался угол наблюдения места спутников, совершенствовались модели океанической нагрузки на перманентные станции, улучшались алгоритмы фиксирования фазовых неоднозначностей, разрабатывались модели абсолютных вариаций фазового центра комбинаций антенна — купол. В тоже время различные модели, стратегии и реализации Международной земной системы отсчета (ITRS) вносили свои коррекции в точность определения координат. Эти эффекты, вносимые различиями в используемых моделях, априорных данных и программном обеспечении, вызвали несогласованность полученных временных рядов перманентных ГНСС-станций.

Кампания репроцессинга Международной ГНСС-службы (IGS) «IGS Repro1» показала улучшение точности полученных координатных рядов и параметров тропосферы, в том числе снижение уровня шума, влияющего на прохождение GPS-сигнала. Улучшения удалось достичь благодаря новой модели океанической нагрузки на перманентные станции, использованию абсолютных вариаций фазового центра комбинаций антенна — купол, новым эфемеридам GPS-спутников и параметрам вращения Земли, полученным уже в результате кампании репроцессинга «IGS Repro1» [7, 8]. SINEX-файлы решения «IGS Repro1» доступны на ftp-сервере IGS (ftp://igs-rf.ensg.eu/pub/igb/) (решение обозначено как *IGB*).

В 2010 г. Рабочей группой Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), являющейся региональной сетью ГНСС-станций на территории Европы, было принято решение провести репроцессинг наблюдений на ГНСС-станциях, входящих в EPN. Обработка проводилась с учетом географического положения сети (к примеру, использовалась модель движения Евразийской литосферной плиты).

В рамках эталонного теста (Benchmark Test) [10] для формирования комбинированного решения кампании репроцессинга были определены локальные центры анализа, использовавшие программный комплекс «Bernese GPS software ver. 5.0» [5] (11 локальных центров), GAMIT/GLOBK и GIPSY-OASYS (по одному локальному центру). Стоит отметить, что все локальные центры, выполнявшие репроцессинг с помощью «Bernese GPS software ver. 5.0», показали хорошую согласованность полученных результатов [9].

© М. В. ИЩЕНКО, 2012

Получив обнадеживающие результаты тестового репроцессинга, EPN начала кампанию «EPN Repro1», в рамках которой были обработаны архивные GPS-наблюдения на станциях сети. Решение было обозначено как *EU*0. Результаты репроцессинга представлены на ftp-сервере EPN (ftp://igs.bkg.bund.de/EPNrepro1/products/).

В Центре анализа ГНСС-наблюдений Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО НАН Украины) был выполнен репроцессинг наблюдений GPS-спутников для GPS-недель 1236–1399 (14 сентября 2003 г. — 4 ноября 2006 г.). Цель данного репроцессинга — получить однородные ряды координат перманентных ГНСС-станций, прежде всего украинских. Репроцессинг был выполнен для 29 GPS-станций, расположенных на территории Восточной Европы, 12 из которых — на территории Украины. Список GPS-станций представлен в табл. 1, а их географическое положение — на рис. 1.

Таблица 1. **Список GPS-станций**

Идентификатор	Станция	Страна	Международные сети (на 4 ноября 2006 г.)
GLSV	Киев/Голосеево	Украина	IGS, EPN
UZHL	Ужгород	Украина	IGS, EPN
KHAR	Харьков	Украина	IGS, EPN
POLV	Полтава	Украина	IGS, EPN
MIKL	Николаев	Украина	IGS, EPN
SULP	Львов	Украина	IGS, EPN
CRAO	Симеиз	Украина	IGS, MGN
CNIV	Чернигов	Украина	EPN
EVPA	Евпатория	Украина	EPN
ALCI	Алчевск	Украина	
SHAZ	Шацк	Украина	
DNMU	Днепропетровск	Украина	
MDVJ	Менделеево	Россия	IGS, EPN
MOBN	Обнинск	Россия	IGS
ZECK	Зеленчукская	Россия	IGS, EPN
TRAB	Трабзон	Турция	IGS, EPN
ISTA	Стамбул	Турция	IGS, EPN
BUCU	Бухарест	Румыния	IGS, EPN
COST	Констанца	Румыния	EPN
BACA	Бакэу	Румыния	EPN
BAIA	Байя-Маре	Румыния	EPN
DEVA	Дева	Румыния	EPN
GRAZ	Грац	Австрия	IGS, EPN
PENC	Пенц	Венгрия	IGS, EPN
BOR1	Боровец	Польша	IGS, EPN
LAMA	Ольштын	Польша	IGS, EPN
VLNS	Вильнюс	Литва	EPN
KLPD	Клайпеда	Литва	
RIGA	Рига	Латвия	IGS, EPN

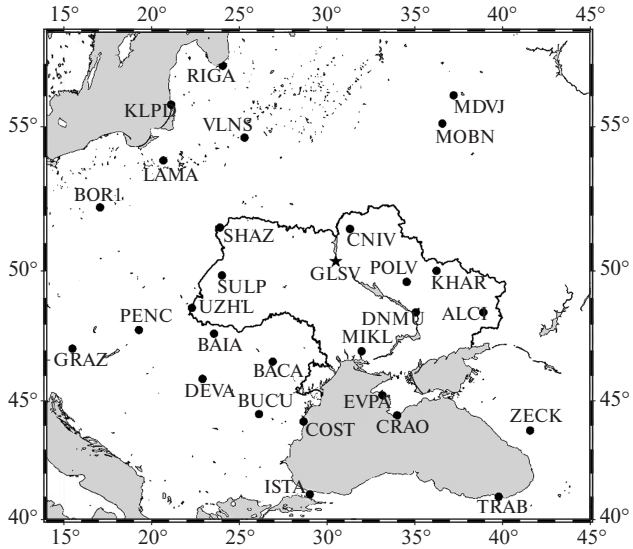

Рис. 1. Расположение GPS-станций

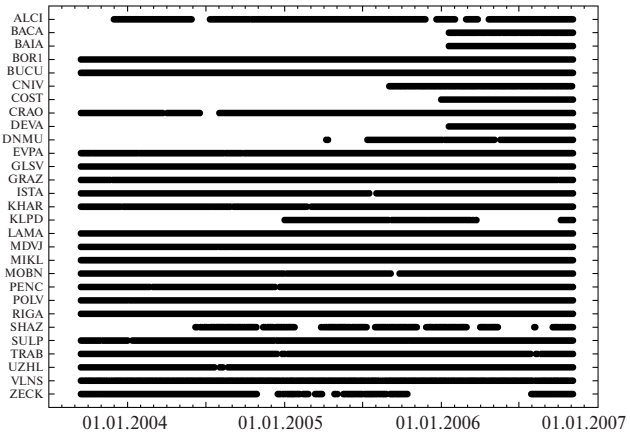

Рис. 2. Диаграмма наблюдений на перманентных станциях

На рис. 2 показана диаграмма наблюдений на перманентных станциях сети.

Обработка была выполнена согласно новым рекомендациям EPN, вступившим в силу с GPS-недели 1400 [6]:

Таблица 2. **Координаты GPS-станций для решения *MA1* и разности координат между решениями *MA*1 и *EU*0, *MA*1 и *IGB* для GPS-недели 1399 (система координат: IGS05, эпоха: 1 ноября 2006 г. 12 ч 00 мин 00 с, время GPS)**

Станция	X_{MA1}, м $X_{MA1} - X_{EU0}$, м $X_{MA1} - X_{IGB}$, м	Y_{MA1}, м $Y_{MA1} - Y_{EU0}$, м $Y_{MA1} - Y_{IGB}$, м	Z_{MA1}, м $Z_{MA1} - Z_{EU0}$, м $Z_{MA1} - Z_{IGB}$, м	Станция	X_{MA1}, м $X_{MA1} - X_{EU0}$, м $X_{MA1} - X_{IGB}$, м	Y_{MA1}, м $Y_{MA1} - Y_{EU0}$, м $Y_{MA1} - Y_{IGB}$, м	Z_{MA1}, м $Z_{MA1} - Z_{EU0}$, м $Z_{MA1} - Z_{IGB}$, м
GLSV	3512888.9164 –0.0014 0.0003	2068979.9021 –0.0030 0.0005	4888903.2181 –0.0025 –0.0058	ISTA	4208830.2732 –0.0009 0.0034	2334850.3360 –0.0024 0.0014	4171267.2604 –0.0021 –0.0065
UZHL	3907587.4231 –0.0007 0.0032	1602428.7224 –0.0033 –0.0007	4763783.7753 –0.0014 –0.0039	BUCU	4093760.8361 0.0005 0.0046	2007793.8385 –0.0013 0.0032	4445129.9896 –0.0013 –0.0037
KHAR	3312984.2903 –0.0019 0.0020	2428203.4624 –0.0032 0.0017	4863307.8359 –0.0033 –0.0082	COST	4021613.6689 –0.0010 n/a	2197896.3639 –0.0025 n/a	4421014.7147 –0.0025 n/a
POLV	3411557.3074 –0.0013 0.0006	234864.0129 –0.0030 0.0008	4834396.9000 –0.0027 –0.0054	BACA	3917524.9356 –0.0007 n/a	1988524.1326 –0.0026 n/a	4608585.6250 –0.0013 n/a
MIKL	3698553.9493 –0.0017 0.0039	2308676.0304 –0.0032 0.0017	4639769.5066 –0.0027 –0.0036	BAIA	3945839.7481 0.0001 n/a	1720428.2930 –0.0032 n/a	4691082.7247 –0.0019 n/a
SULP	3765296.9567 –0.0012 0.0034	1677559.2308 –0.0032 0.0016	481297.4224 –0.0023 –0.0017	DEVA	4097210.4635 –0.0008 n/a	1731870.4169 –0.0032 n/a	4556026.7684 –0.0025 n/a
CNIV	3397785.1825 –0.0013 n/a	2066990.5707 –0.0032 n/a	4969811.5963 –0.0025 n/a	GRAZ	4194423.7880 –0.0001 0.0051	1162702.7251 –0.0028 –0.0006	4647245.4301 –0.0012 –0.0018
EVPA	3767253.4523 –0.0017 n/a	2461876.3777 –0.0029 n/a	4504591.8160 –0.0028 n/a	PENC	4052449.4329 –0.0010 0.0029	1417681.1526 –0.0027 –0.0004	4701407.1178 –0.0016 –0.0042
CRAO	3783897.0719 n/a 0.0036	2551404.4460 n/a 0.0031	4441264.2960 n/a –0.0044	BOR1	3738358.4220 0.0007 0.0037	1148173.7350 –0.0021 –0.0006	5021815.7862 0.0007 –0.0015
ZECK	3451174.6703 –0.0026 0.0037	3060335.4675 –0.0035 0.0060	4391955.6673 –0.0038 –0.0036	LAMA	3524522.8860 0.0000 0.0023	1329693.6520 –0.0025 –0.0008	5129846.3548 –0.0002 –0.0021
MDVJ	284556.0430 n/a –0.0001	2160954.2681 n/a 0.0008	5265993.2439 n/a –0.0014	VLNS	3343600.5805 –0.0006 n/a	1580417.7616 –0.0027 n/a	5179337.3025 –0.0016 n/a
MOBN	2936432.0167 n/a –0.0021	2178364.5752 n/a 0.0005	5208858.2602 n/a –0.0061	RIGA	3183899.1629 0.0000 0.0016	1421478.5140 –0.0026 –0.0002	5322810.8151 –0.0013 0.0003
TRAB	3705250.3326 –0.0025 0.0020	3084421.7262 –0.0029 0.0036	4162044.1907 –0.0046 –0.0081	KLPD	3359228.1008 n/a 0.0021	1297490.5008 n/a –0.011	5246690.3582 n/a –0.0022

• эфемериды GPS-спутников и координаты станций задавались в системе координат IGS05 (IGS-реализация системы координат ITRF2005);

• использовалась модель океанической нагрузки FES2004;

• использовались абсолютные калибровки фазовых центров комбинаций антенна — купол и т. д. [2].

Решение было выполнено с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0». Обозначим это решение как *MA*1.

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на четыре этапа [3, рис. 2, 3].

1. Предварительная обработка суточных сессий наблюдений.

2. Получение оценок координат для отдельного дня наблюдений.

3. Получение оценок координат для отдельной недели.

4. Получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» (отсутствие общего смещения) на координаты референцных станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 и TRAB. Априорные координаты и скорости референцных станций на эпоху 2000.0 были получены из каталога IGS05.

Полученные файлы для решения *MA*1 в формате SINEX размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/products/IGS05/).

В табл. 2 показаны разности координат между решениями *MA*1 и *EU*0, *MA*1 и *IGB* для GPS-недели 1399 (29 октября — 4 ноября 2006 г.). Максимальные абсолютные значения разностей координат между решениями *MA*1 и *EU*0 составили:

по оси *X*: 2.6 мм для станции ZECK,

по оси *Y*: 3.5 мм для станции ZECK,

по оси *Z*: 4.6 мм для станции TRAB.

Максимальные значения разностей координат между решениями *MA*1 и *IGB* составили:

по оси *X*: 3.7 мм для станции ZECK,

по оси *Y*: 6.0 мм для станции ZECK,

по оси *Z*: 8.1 мм для станции TRAB.

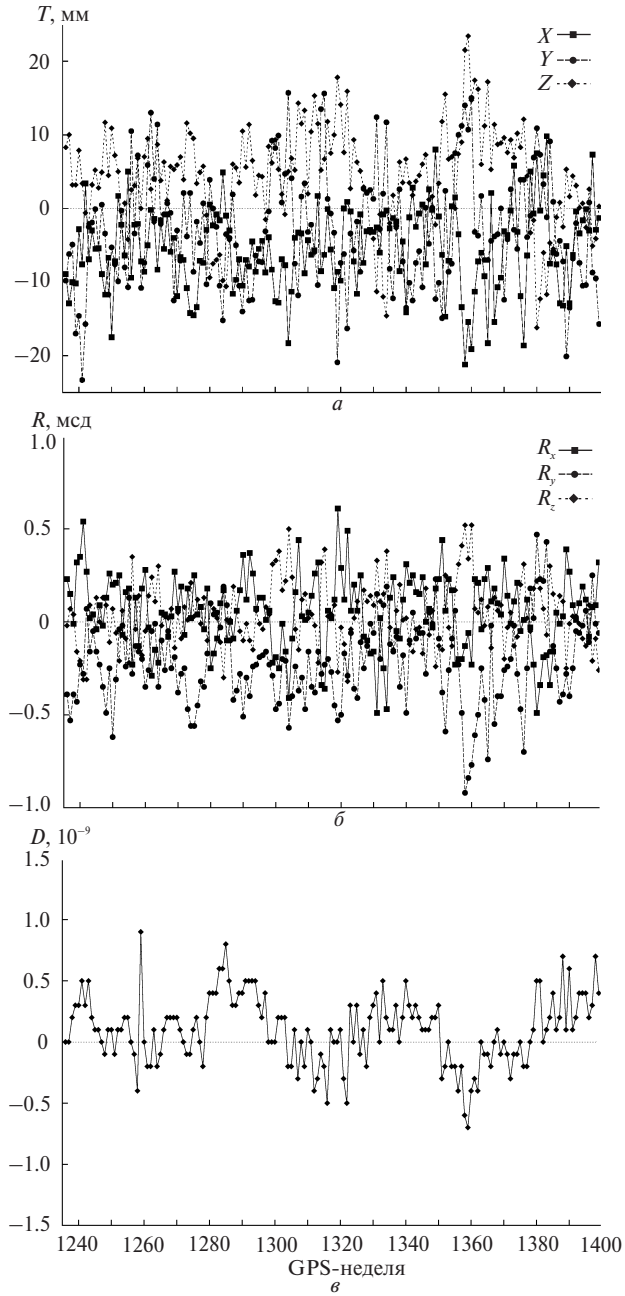

Рис. 3. Параметры преобразований Гельмерта между решениями *MA*1 и *EU*0: *а* — смещение *T*, *б* — вращение *R*, *в* — масштабный множитель *D*

Сравнение решений *MA*1 и *EU*0, *MA*1 и *IGB* выполнялось путем определения параметров преобразования Гельмерта. Сравнение было выполнено для GPS-станций, общих для всех трех решений для каждой GPS-недели.

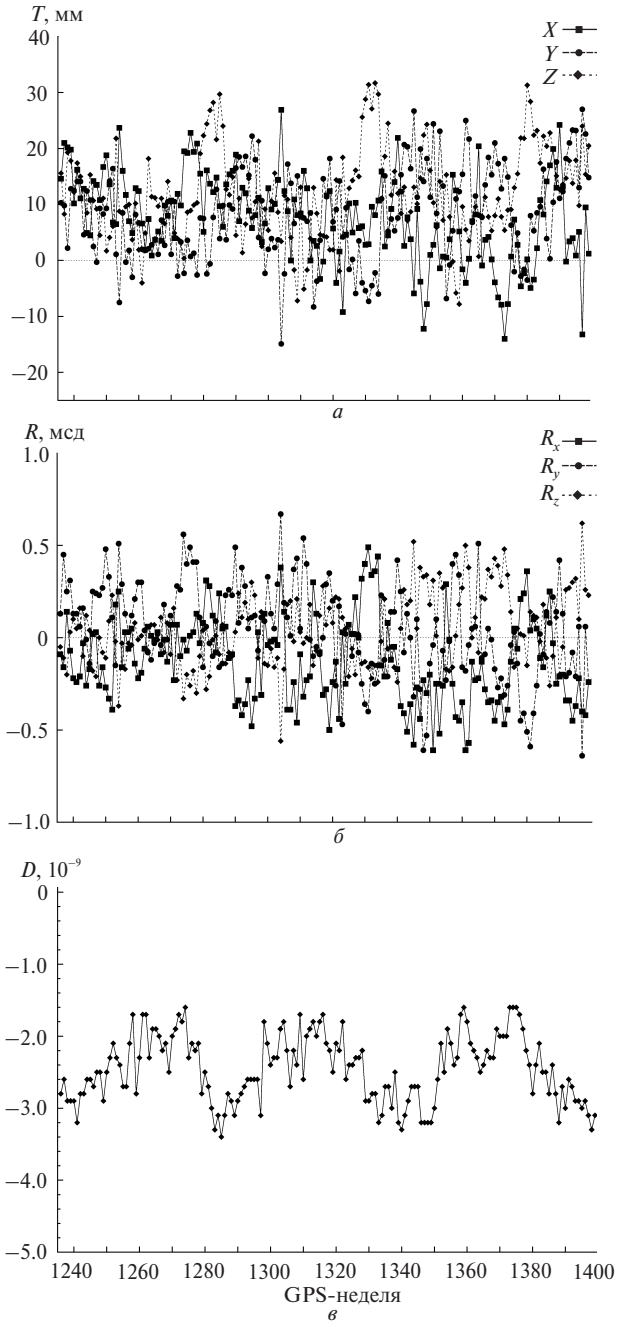

Рис. 4. То же между решениями *MA*1 и *IG*B

Значения параметров преобразований Гельмерта между решениями *MA*1 и *EU*0, *MA*1 и *IGB* представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Минимальные и максимальные значения полученных параметров преобразования между решениями *MA*1 и *EU*0 приведены ниже.

Смещение:
по оси *X*: –21.2 ... 9.8 мм,
по оси *Y*: –23.3 ... 15.7 мм,
по оси *Z*: –16.2 ... 23.4 мм.
Вращение:
вокруг оси *X*: –0.49 ... 0.61 мсд,
вокруг оси *Y*: –0.92 ... 0.47 мсд,
вокруг оси *Z*: –0.32 ... 0.52 мсд.
Масштабный множитель: $(-0.7 \ldots 0.9)\cdot 10^{-9}$.

Минимальные и максимальные значения полученных параметров преобразования между решениями *MA*1 и *IGB* приведены ниже.

Смещение:
по оси *X*: –14.0 ... 24.2 мм,
по оси *Y*: –8.3 ... 26.7 мм,
по оси *Z*: –5.1 ... 29.7 мм.
Вращение:
вокруг оси *X*: –0.61 ... 0.49 мсд,
вокруг оси *Y*: –0.61 ... 0.47 мсд,
вокруг оси *Z*: –0.33 ... 0.50 мсд.
Масштабный множитель: $(-3.3 \ldots -1.7)\cdot 10^{-9}$.

На рис. 5 и 6 показаны средние значения остатков координат на перманентных станциях после преобразований Гельмерта между решениями *MA*1 и *EU*0, *MA*1 и *IGB* соответственно для северной, восточной и высотной компонент.

Наименьшие и наибольшие разности для решений *MA*1 и *EU*0 по модулю для северной, восточной и высотной составляющих равны:

по оси *X*: от 0.01 мм (для станции EVPA) до 0.48 мм (для станции BAIA),

по оси *Y*: от 0.00 мм (для станции EVPA) до 0.38 мм (для станции MDVJ),

по оси *Z*: от 0.01 мм (для станции MIKL) до 2.01 мм (для станции DEVA),

а для решений *MA*1 и *IGB* —

по оси *X*: от 0.06 мм (для станции GLSV) до 0.60 мм (для станции MDVJ),

по оси *Y*: от 0.01 мм (для станции SULP) до 0.39 мм (для станций PENC и MDVJ),

по оси *Z*: от 0.29 мм (для станции UZHL) до 4.59 мм (для станции MOBN).

При наличии трех разных решений стало возможным получить «внешние» оценки точности для решений. Поскольку каждое решение представляет свою координатную реализацию, то при выполнении трансформации Гельмерта

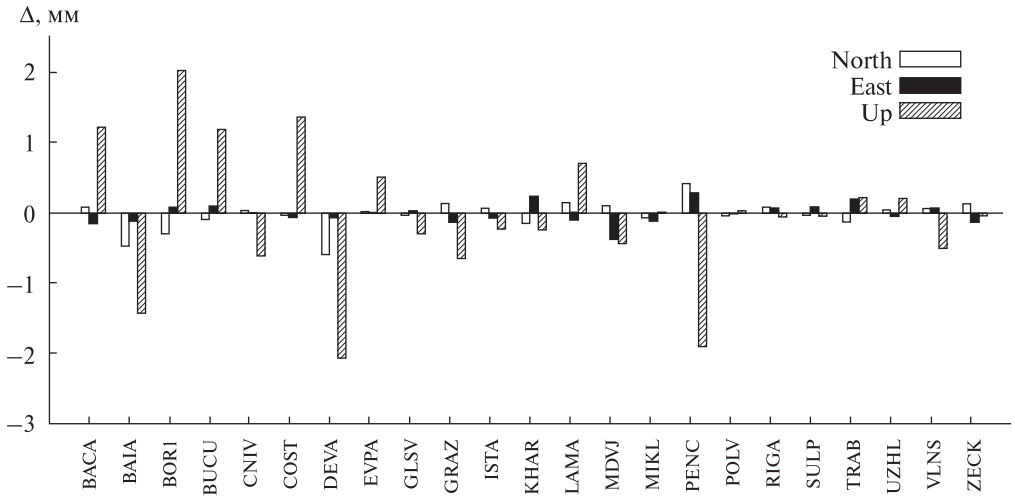

Рис. 5. Значения средних остатков координат после преобразований Гельмерта между решениями *MA*1 и *EU*0

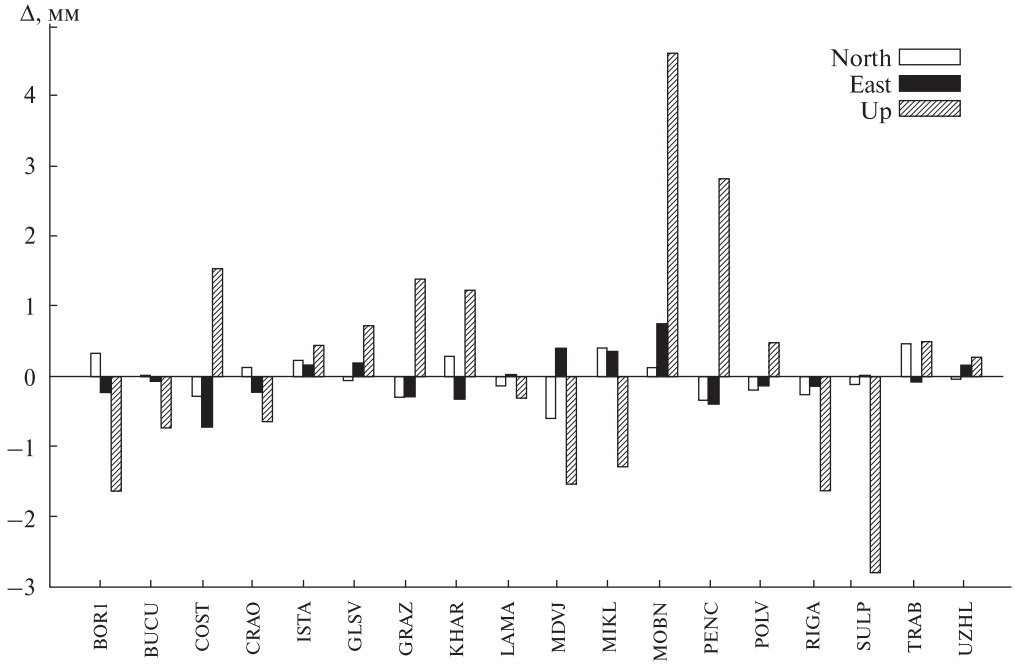

Рис. 6. То же между решениями *MA*1 и *IGB*

решения *MA*1 и *EU*0 были приведены к координатной реализации решения *IGB*. Это позволило исключить систематические ошибки. Так как все три решения основаны практически на одном и том же наблюдательном материале, то между ними должна наблюдаться большая взаимная корреляция.

Для расчета «внешних» погрешностей решений и коэффициентов корреляций применен метод, который был разработан и использовался в ГАО НАН Украины [1, 4]. Суть метода лежит в следующем. Пусть имеем M решений с N общими станциями. Обозначим одну из координат (X, Y или Z) через x.

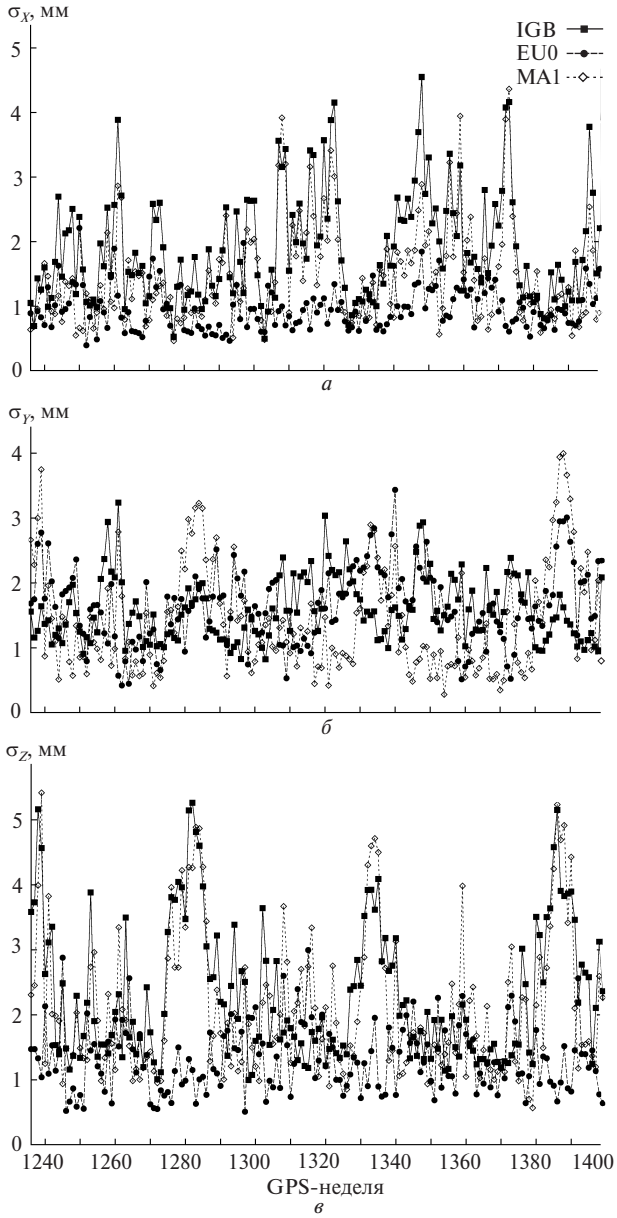

Рис. 7. Значения «внешних» средних квадратичных ошибок решений *MA*1, *EU*0 и *IGB* по координатам *X* (*а*), *Y* (*б*), *Z* (*в*)

Для i-й станции найдем значения x_i^0 и погрешность σ_i^0:

$$x_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^{M} p_i^{(j)} x_i^{(j)}}{\sum_{j=1}^{M} p_i^{(j)}}, \quad (\sigma_i^0)^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{M} p_i^{(j)}},$$

где $p_i^{(j)} = \sqrt{\sigma_i^{(j)}}$ — вес координаты i-й станции из j-го решения x_i^j. Найдем для каждой общей станции разности координат $\Delta x_i^{j0} = x_i^j - x_i^0$ и будем рассматривать полученные величины $\{\Delta x_i^{j0}\}_{i=1,\ldots N}$ как случайные. Перейдем от них к центрированным величинам и определим математическое ожидание квадратов сумм и разниц полученных центрированных величин для l-го и k-го решений:

$$d_{kl} = M[(\Delta\hat{x}^{k0} - \Delta\hat{x}^{l0})^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 - \rho_{kl}\sigma_k\sigma_l,$$

$$s_{kl} = M[(\Delta\hat{x}^{k0} - \Delta\hat{x}^{l0})^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 + \rho_{kl}\sigma_k\sigma_l,$$

где $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания, σ_k и σ_l — «внешние» средние квадратичные погрешности определения координат l-го и k-го решений, ρ_{kl} — коэффициент корреляции между соответствующими координатами l-го и k-го решений, Δx^{k0} — центрованные значения Δx_i^{k0}.

В случае трех решений, создавая суммы d_{kl} и s_{kl}, получим линейную систему уравнений относительно σ_k^2 (k = 1, 2, 3), решение которой можно записать в виде

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4}(s_{12} + s_{13} - s_{23} + d_{12} + d_{13} - d_{23}),$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{4}(s_{12} + s_{23} - s_{13} + d_{12} + d_{23} - d_{13}),$$

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{4}(s_{23} + s_{13} - s_{12} + d_{23} + d_{13} - d_{12}).$$

Из выражений для d_{kl} и s_{kl} можно получить выражение для коэффициентов корреляции:

Таблица 3. **Средние «внешние» оценки точности решений: средние квадратичные ошибки и коэффициенты корреляций**

Координата	σ_{IGS}, мм	σ_{EU0}, мм	σ_{MA1}, мм	$\rho_{IGS-EU0}$	$\rho_{IGS-MA1}$	$\rho_{EU0-MA1}$
X	1.878	0.966	1.451	–0.608	–0.794	0.122
Y	1.573	1.644	1.413	–0.608	–0.418	–0.252
Z	2.310	1.307	2.127	–0.408	–0.752	–0.115

$$\rho_{12} = \frac{s_{12} - d_{12}}{4\sigma_1\sigma_2}, \ \rho_{12} = \frac{s_{13} - d_{13}}{4\sigma_1\sigma_3}, \ \rho_{12} = \frac{s_{23} - d_{23}}{4\sigma_2\sigma_3}.$$

Результаты сравнения решений *MA*1, *EU*0 и *IGB* приведены в табл. 3. На рис. 7 представлены «внешние» средние квадратичные погрешности по координатам *X*, *Y* и *Z* для решений *MA*1, *EU*0 и *IGB*.

ВЫВОДЫ

С помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» был выполнен репроцессинг GPS-наблюдений для GPS-недель 1236-1399 и получены координатные ряды для 29 ГНСС-станций (решение *MA*1).

Для проверки качества решения были вычислены параметры преобразований Гельмерта между решением *MA*1, комбинированным решением *EU*0 (результат кампании репроцессинга Европейской перманентной ГНСС-сети) и комбинированным решением *IGB* (результат кампании репроцессинга Международной ГНСС-службы). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что результаты репроцессинга, выполненного в Центре анализа ГНСС-наблюдений ГАО НАН Украины, соответствуют по качеству результатам репроцессингов EPN и IGS. Основные отличия вызваны различиями в геометрии сети и набором референцных станций для задания системы координат.

Работа выполнялась как конкурсная тема «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» в рамках целевой комплексной программы фундаментальных исследований НАН Украины «Дослідження сонячно-земних зв'язків та їхнього впливу на функціонування геосистем (ГЕОКОСМОС)», 2011 р., и целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012 г.

1. *Болотін С. Л., Литвин С. О.* Порівняння об'єднаннях каталогів RSC (GAOUA)05 C 03 та RSC(PUL)06 C 02 з реалізацією Міжнародної небесної системи відліку ICRF / Кинематика и физика небес. тел. — 2010. — 26, № 1. — С. 31—42.
2. *Ищенко М. В., Хода О. А.* Репроцессинг GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1390-1399 // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 5. — С. 40—50.
3. *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.
4. *Чолий В. Я.* Сравнение различных реализаций земной системы координат, построенных по данным лазерной локации искусственных спутников Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 1987. — **3**, № 4. — С. 75—79.
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. Guidelines for EPN Analysis Centres // Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau [электронный ресурс: http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf]
7. *Gendt G., Griffiths J., Nischan T., Ray J.* IGS Reprocessing — Summary of Orbit/Clock Combination and First Quality Assessment // Presented at the IGS Workshop 2010. — Newcastle upon Tyne (United Kingdom). — 2010.
8. *Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., et al.* Reprocessing of a global GPS network, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, Nr. B5, EID B05402, American Geophysical Union, ISSN 0148-0227, DOI: 10.1029/2005JB003747, 2006.
9. *Völksen C.* An Update on the EPN Reprocessing Project: Current Achievements and Status / Project EUREF Symposium 2011, Moldova, 25—28 May 2011 [Электронный ресурс: http://www.euref.eu/symposia/2011Chisinau/01-06-p-Voelksen.pdf]
10. *Völksen C.* EPN Reprocessing: Report on the current status of the EPN / Project EUREF Symposium, Sweden, 2—5 June 2010 [Электронный ресурс: http://www.euref.eu/symposia/2010Gavle/01-05-Voelksen.pdf].

Надійшла до редакції 05.06.12

M. V. Ischenko

QUALITY ESTIMATION FOR THE REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS AT PERMANENT STATIONS OF THE REGIONAL NETWORK FOR GPS WEEKS 1236–1399

Observations of GPS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe were reprocessed with the *Bernese GPS Software ver. 5.0* using new models and processing procedures adopted by the International GNSS Service since GPS week 1400. Coordinates of the GPS stations for GPS weeks 1236–1399 were determined. To estimate the quality of the solution obtained, its comparison with the combined solutions obtained during the reprocessing campaigns of the International GNSS Service and European Permanent GNSS Network was performed.