

М. В. Ищенко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

РЕПРОЦЕССИНГ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 935—1399

Приведены результаты обработки архивных GPS-наблюдений (репроцессинга), выполненной в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины для периода наблюдений с 7 декабря 1997 г. по 4 ноября 2006 г. (464 GPS-недели) для 31 GPS-станции, расположенных на территории Восточной Европы (12 из которых — на территории Украины). Впервые получены однородные координатные ряды в системе координат IGS05 и значения зенитной тропосферной рефракции для этих станций для GPS-недель 935—1399, лишённые эффектов, приносимых изменениями в методиках обработки, моделях, априорных данных и программном обеспечении.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.), IGS ввело новые модели и методики обработки ГНСС-наблюдений. Рекомендовано использовать абсолютные модели вариаций фазовых центров комбинаций антенна-купол вместо относительных, модель океанической нагрузки FES2004 вместо GOT00.2_PP и т. д. С этого же момента все продукты IGS, включая комбинированные точные эфемериды ГНСС-спутников, координаты и скорости перманентных ГНСС-станций, выражаются в системе координат IGS05 (IGS-реализация системы координат ITRF2005).

Изменения методик обработки, моделей, априорных данных и программного обеспечения привели к несогласованности координатных рядов перманентных ГНСС-станций, полученных до и после 5 ноября 2006 г.

В 2008 г. IGS начала кампанию репроцессинга, которая была направлена на улучшение орбит GPS-спутников [13]. Наличие точных эфемерид в системе координат IGS05 позволило организовать репроцессинг архивных данных GPS-наблюдений в Центре анализа ГАО НАН Украины. Для репроцессинга использовались рекомендации Центрального Бюро Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), вступившие в

силу с GPS-недели 1400 [http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php].

Цель представленного репроцессинга — получить согласованные координатные ряды и значения зенитной тропосферной рефракции для восточноевропейских GPS-станций. Решение данной проблемы позволит уточнить результаты в следующих направлениях: определение параметров вращения Земли, исследование деформации земной коры и атмосферы планеты, уточнение земной системы координат, которая задается координатами и скоростями ГНСС-станций и т. д.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕПРОЦЕССИНГ НАБЛЮДЕНИЙ

В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины выполнен репроцессинг наблюдений GPS-спутников для GPS-недель 935—1399 (с 7 декабря 1997 г. по 4 ноября 2006 г.). Репроцессинг выполнен для 31 восточноевропейской GPS-станции, 12 из которых — на территории Украины. Список GPS-станций приведен в табл. 1, а их географическое расположение — на рис. 1. Для получения решения использовался программный комплекс «Bernese GPS Software ver. 5.0» [3], разработанный в Астрономическом институте Бернского университета, Швейцария. Данный программный комплекс позволяет об-

рабатывать как кодовые, так и фазовые наблюдения ГНСС-спутников на пунктах локального, регионального и глобального масштабов. С помощью модуля «Bernese Processing Engine», который входит в «Bernese GPS Software ver. 5.0», стало возможным выполнять автоматизированную обработку сетей, состоящих из большого количества перманентных ГНСС-станций.

В результате обработки доступны координаты станций с высокой точностью, параметры орбит

спутников, поправки к часам спутников и приемников, параметры тропосферной и ионосферной рефракции и т. д.

Для выполнения репроцессинга были использованы 30-секундные файлы наблюдений GPS-спутников в формате RINEX. Данные наблюдений для украинских станций доступны на ftp-сервере ГАО НАН Украины (ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/data/CRINEX_30s/). Решение обозначено как *MAI*.

Использовались комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, которые были рассчитаны в рамках кампании репроцессинга *IGS Repro 1* [13].

Абсолютные калибровки фазовых центров комбинаций «антенна — купол» были взяты из стандартного файла в формате ANTEX [http://www.iers.org/products/2/11428/orig/message_071.txt], который рекомендовано использовать IGS при обработке ГНСС-наблюдений.

Океанические нагрузки для станций были рассчитаны по модели FES2004 [6].

Использовалась гравитационная модель JGM3 и эфемериды Солнца и Луны DE2000 [12], предоставленные Лабораторией реактивного движения JPL, США.

При использовании поправок к показателям часов GPS-спутников использовались оценки разностей кодовых наблюдений. Оценки пред-

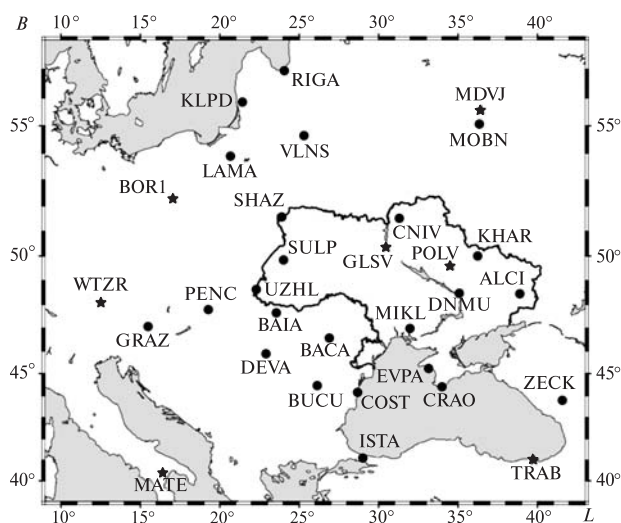


Рис. 1. Расположение GPS-станций

Таблица 1. Список перманентных GPS-станций за период наблюдений GPS-недель 935—1399

Станция	Страна	Идентификатор	Номер DOMEС	Международные сети	Приемник	Антенна	Купол	Примечание
Киев/Голосиив	Украина	GLSV	12356M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Симеиз	Украина	CRAO	12337M002	IGS, MGN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	SCIS	
Евпатория	Украина	EVPA	12344M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Харьков	Украина	KHAR	12314M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Николаев	Украина	MIKL	12335M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Полтава	Украина	POLV	12336M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	NONE	
Львов	Украина	SULP	12366M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4700	TRM33429.20+GP RM41249.00	NONE NONE	до 10.06.2001 с 13.10.2001
Ужгород	Украина	USHL	12301M001	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Чернигов	Украина	CNIV	15501M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Алчевск	Украина	ALCI	12371S001		TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Шацк	Украина	SHAZ	12370M001		TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	

Продолжение табл. 1

Станция	Страна	Идентификатор	Номер DOMEC	Международные сети	Приемник	Антенна	Купол	Примечание
Днепропетровск	Украина	DNMU	12369M001		TRIMBLE 7400MSI	TRM14532.00	NONE	
Зеленчукская	Россия	ZECK	12351M001	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T AOAD/M_T	NONE NONE	до 12.07.2001 с 12.07.2001 до 18.10.2005 с 30.07.2006
Менделеево	Россия	MDVJ	12309M005	EPN, IGS	ASHTECK Z-XII3 JPS LEGACY	ASH700936D_M JPSREGANT_ DD_E	SNOW NONE	
Обнинск	Россия	MOBN	12365M001	IGS	ASHTECK Z-XII3	ASH701945C_M	SCIS	
Боровец	Польша	BOR1	12205M002	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	NONE	
Ольштын	Польша	LAMA	12209M001	EPN, IGS	ROGUE SNR-8000 ASHTECK Z-XII3	AOAD/M_T ASH700936F_C	NONE SNOW	до 25.04.1998 с 26.04.1998
Трабзон	Турция	TRAB	20808M001	EPN, IGS	ASHTECK Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Стамбул	Турция	ISTA	20807M001	EPN, IGS	ASHTECK Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Бухарест	Румыния	BUCU	11401M001	EPN, IGS	ASHTECK Z-XII3	ASH700936D_M	SNOW	
Констанца	Румыния	COST	11407M001	EPN	ASHTECK Z-X	ASH700936B_M	NONE	
Бакэу	Румыния	BACA	11405M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Байя-Маре	Румыния	BAIA	11406M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Дева	Румыния	DEVA	11408M001	EPN	LEICA RX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Грац	Австрия	GRAZ	11001M002	EPN, IGS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT ROGUE SNR-8000 ASHTECK UZ-12 TRIMBLE NETRS	AOAD/M_T AOAD/M_T AOAD/M_T ASH701945C_M ASH701945C_M	NONE NONE NONE NONE NONE	до 10.05.2000 с 05.10.2000 до 01.07.2000 с 01.07.2000 до 29.04.2001 с 29.04.2001 до 17.03.2005 с 17.03.2005 до 22.03.2005 с 22.03.2005
Пенц	Венгрия	PENC	11206M006	EPN, IGS	TRIMBLE 4000SSE TRIMBLE 5700	TRM14532.00 TRM41249.00	NONE	до 20.05.2003 с 22.05.2003
Вильнюс	Литва	VLNS	10801M001	EPN, ECGN	ASHTECK Z-XII3	ASH700936A_M	NONE	
Рига	Латвия	RIGA	12302M002	EPN, IGS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA BENCHMARK ACT AOA BENCHMARK ACT ROGUE SNR-8000	ASH700936D_M AOAD/M_T ASH700936D_M ASH700936D_M	NONE NONE NONE NONE	до 13.01.2005 с 13.01.2005 до 20.05.2006 с 22.05.2006 до 17.06.2006 с 18.06.2006
Матера	Италия	MATE	12734M008	EPN, IGS, TOS	ROGUE SNR-8100 TRIMBLE 4000SSI	AOAD/M_T TRM29659.00	NONE NONE	до 08.06.1999 с 18.06.1999
Ветцель	Германия	WTZR	14201M010	EPN, IGS, TOS, ECGN	ROGUE SNR-8000 AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	NONE	до 17.06.1999 с 17.06.1999

ставлены в виде DCB-файлов, которые являются продуктом Центра анализа CODE [5].

Координаты и скорости априорных станций на эпоху 2000.0, задававшие систему координат, взяты из каталога IGS05. В табл. 2 приведены значения координат и скоростей для GPS-станций GLSV, POLV, BOR1, MDVJ, MATE, TRAB и WTZR.

Для моделирования значений зенитной тропосферной рефракции использовалась априорная модель Саастамойнена [10].

Использовалась глобальная модель ионосферы на каждые сутки, представленная Центром анализа CODE [11].

Для учета нутации и прецессии использовалась модель IAU2000 [7], рекомендованная IERS. Модель включает в себя коэффициенты для солнечно-лунных и планетных нутаций, а также их аргументы.

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на несколько эта-

пов. Схема этапов обработки представлена в работе [1]:

- 1) предварительная обработка суточных сессий наблюдений;
- 2) получение оценок координат для отдельных суток наблюдений;
- 3) получение оценок координат для отдельной недели;
- 4) получение финальных значений зенитной тропосферной рефракции для GPS-станций.

На этапе предварительной обработки сначала выполнялась проверка качества наблюдений на уровне RINEX-файлов и преобразование данных во внутренние форматы программного комплекса. С помощью программы PRETAB выполнялось преобразование точных эфемерид GPS-спутников с земной системы координат в небесную и интегрирование (программа ORBGEN), в результате чего были получены так называемые табличные орбиты. Файлы стандартных орбит создавались с помощью интегрирования движения GPS-спутников.

С помощью программы RNXGRA с RINEX-файлов данных наблюдений собиралась информация о количестве и качестве наблюдений для каждой GPS-станции. В соответствии с установленными параметрами станции, наблюдения на которых не соответствовали минимальным установленным критериям, исключались из дальнейшей обработки. На следующем этапе выполнялось объединение нескольких файлов с координатами/скоростями в один полный набор координат/скоростей с возможностью добавления новых станций с помощью программы CRDMERGE. Программа NUVELO вычисляла скорости станций с учетом модели движения тектонических плит, используя модель NNR-NUVEL-1A [2], согласно рекомендациям собрания IERS2004. После получения новых значений скоростей движения GPS-станций снова выполнялась программа CRGMERGE. На следующем шаге выполнялось вычисление координат на эпоху середины дня наблюдений с помощью соответствующих значений скоростей для станции, которые были получены ранее. После этого высчитывались поправки к часам на приемниках, расположенных на GPS-станциях (програм-

Таблица 2. Априорные координаты и скорости GPS-станций (система координат IGS05, эпоха 2000.0)

Станция	Координата, м	Скорости, м/год
	X Y Z	V_x V_y V_z
GLSV	3512889.0509	-0.0194
	2068979.8074	0.0083
	4888903.1612	0.0083
POLV	3411557.4503	-0.0211
	2348463.9223	0.0129
	4834396.8425	0.0076
BOR1	3738358.5380	-0.0157
	1148173.6323	0.0156
	5021815.7236	0.0095
MDVJ	2845456.1887	-0.0211
	2160954.1827	0.0128
	5265993.1839	0.0090
MATE	4641949.6466	-0.0179
	1393049.3344	0.0188
	4133287.3864	0.0155
TRAB	3705250.4858	-0.0230
	3084421.6286	0.0135
	4162044.7216	0.0104
WTZR	4075580.5290	-0.0151
	931853.7115	0.0173
	4801568.0771	0.0114

ма CODSP). Предварительная обработка фазовых наблюдений позволяла определить моменты скачков фаз. Далее выполнялась маркировка наблюдений с короткими интервалами наблюдений спутников с углом места менее 3° . Кроме этого, исключались из обработки станции с большим количеством плохих наблюдений (программа MAUPRP). На следующем этапе обработки с помощью программы GPSEST было получено решение с действительными значениями фазовой неоднозначности с помощью линейной комбинации LC3 [4, 11]. Наряду с этим выполнялась оценка параметров тропосферы. Для задания априорной модели Саастамойнена использовалась опция DRY_NIELL [9] и функция наклона pmfh2.0 для приведения к зениту. Для задания функции наклона для параметра зенитной тропосферной рефракции, который оценивался, использовалась опция WET_NIELL. Для оценки горизонтального тропосферного градиента задавалась опция TILTING. Фиксирование фазовых неоднозначностей выполнялось с помощью методики QIF [8]. Для уменьшения влияния ионосферы использовалась детерминированная модель ионосферы, основанная на разложении общего содержания электронов в ряд по сферическим гармоникам в зависимости от географической широты и часового угла Солнца.

Далее выполнялась обработка наблюдений с фиксированными фазовыми неоднозначностями с целью получения нормальных уравнений. Зенитная тропосферная рефракция была оценена с использованием априорной модели и опций наклона. С помощью программы ADDNEQ создавались файлы нормальных уравнений. На координаты станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1, TRAB, MATE и WTZR накладывалось условие «No-net translation». Параметры преобразования Гельмерта (только смещение) между системой координат, которая задавалась оцененными координатами референчных станций, и системой координат, которая задавалась координатами референчных станций из каталога IGS05, должны равняться нулю в пределах погрешности. Проверка выполнялась программой HELMR1. Если остатки после преобразования для любой компоненты координат любой референчной

станции превышали заданные максимальные значения, то эта станция исключалась из списка референчных станций для этой эпохи и выполнялось повторное уравнивание с использованием нового набора референчных станций (программа ADDNEQ2). Финальное уравнивание позволило получить оценки координат для суточных решений и нормальные уравнения, которые сохранились в формате SINEX. После того как было получено решение для всех дней недели, выполнялось уравнивание суточных файлов нормальных уравнений с помощью программы ADDNEQ2. Задание системы координат и проверка оценки координат референчных станций выполнялись так же, как и для суточного решения с помощью программы HELMR1. Сохранялся итоговый файл для недельного решения в формате SINEX.

На последнем этапе выполнялась финальная оценка зенитной тропосферной рефракции отдельно для каждого суток для каждой GPS-станции с помощью программы ADDNEQ2. При этом фиксировались координаты всех станций, которые были получены на третьем шаге. Сохранялся финальный файл оценки параметров тропосферы в формате TROPX.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполненной обработки архивных наблюдений GPS-наблюдений в Центре анализа ГНСС-данных получены однородные координатные ряды и значения зенитной тропосферной рефракции GPS-станций для GPS-недель 935—1399. В качестве примера в табл. 3 приведены значения полученных координат для GPS-недель 1090, 1206 и 1399 для 12 украинских перманентных станций в системе координат IGS05. Полученные файлы решения *MA1* для 31 GPS-станции в форматах SINEX и TROPX размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGS05/>). В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции для станций в середине (ГНСС-станция EVPA) и на краю сети (ГНСС-станция CRAO). Графики для остальных украинских ГНСС-станций, для которых было

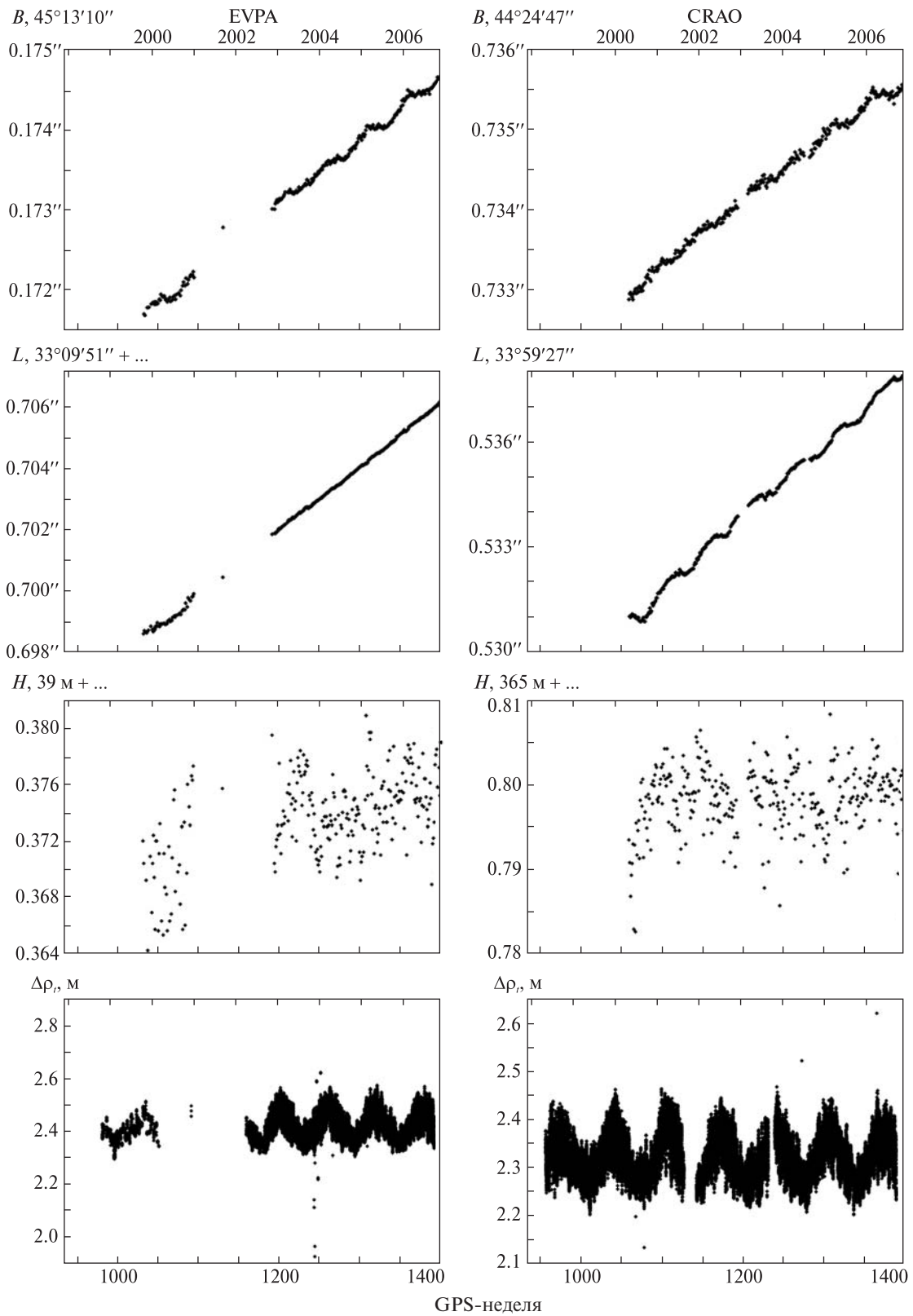


Рис. 2. Значения изменений широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции для ГНСС-станций EVPA и CRAO

Таблица 3. Значения координат для GPS-недель 1090, 1206 и 1399 в системе координат IGS05 для украинских GPS-станций

Станция	GPS-неделя 1090	GPS-неделя 1206	GPS-неделя 1399
	X, м Y, м Z, м	X, м Y, м Z, м	X, м Y, м Z, м
GLSV	3512889.0312 2068979.8198 4888903.1675	3512888.9916 2068979.8515 4888903.1864	3512888.9164 2068979.9021 4888903.2181
UZHL	3907587.5306 1602428.6298 4763783.7234	3907587.4846 1602428.6656 4763783.7388	3907587.4231 1602428.7224 4763783.7753
CRAO	3783897.1927 2551404.3540 4441264.2434	3783897.1415 2551404.3933 4441264.2657	3783897.0719 2551404.4460 4441264.2960
EVPA	3767253.5716 2461876.2871 4504591.7577	3767253.5237 2461876.3201 4504591.7798	3767253.4523 2461876.3777 4504591.8160
POLV		3411557.3830 2348463.9655 4834396.8690	3411557.3074 2348464.0129 4834396.9000
KHAR		3312984.3590 2428203.4091 4863307.8070	3312984.2903 2428203.4624 4863307.8359
MIKL		3698554.0218 2308675.9765 4639769.4760	3698553.9493 2308676.0304 4639769.5066
SULP		3765297.0246 1677559.1766 4851297.3886	3765296.9567 1677559.2308 4851297.4224
ALCI			3297847.8933 2661607.4363 4750829.8351
CNIV			3397785.1825 2066990.5707 4969811.5963
DNMU			3468976.8727 2434669.3590 4750720.1331
SHAZ			3631977.9598 1609614.5120 4973373.0815

получено решение MA1, размещены на сайте Украинской перманентной ГНСС-сети (<http://gnss.mao.kiev.ua/>).

Подводя итог, можно сказать, что полученные однородные координатные ряды позволяют получить более точную координатную реализацию ITRF на территории Украины.

Ознакомиться с результатами для украинских станций (на графиках представлены изменения широты, долготы, высоты и зенитной тропосферной рефракции) можно на web-страничке Украинской перманентной сети (<http://gnss.mao.kiev.ua/>) в разделе «Центр аналізу ГНСС-даних».

1. *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.
2. *Argus D., Gordon R.* No-net rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model Nuvel-1 // *Geophys. Res. Lett.* — 1991. — **18**. — P. 2038–2042.
3. *Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M.* Bernese GPS Software version 5.0. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
4. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E.* GNSS — Global Navigation Satellite System. — New York: Spinger, Wien, 2008. — 343 p.
5. *Jefferson D., Heflin D., Muellerschoen R.* Examining the C1-P1 pseudorange bias // *GPS Solutions* N 4(4). — 2001. — P. 25–30.
6. *Lyard F., Lefvre F., Letellier T., Francis O.* Modeling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // *Ocean Dynamics* N 56. — 2006. — P. 394–415.
7. *McCarthy D., Petit G.* IERS Conventions // *IERS Technical Note* 32. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. — 2004.
8. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System // *Geodätisch geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Band 53, Schweizerische Geodätische Kommission, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich. — 1995. — 155 p.
9. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *J. Geophys. Res.* — 1996. — N 101. — P. 3227–3246.
10. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // *The use of artificial satellites for Geodesy*, Vol. 15 of *Geophysics Monogram Series*, AGU. — 1972. — P. 244–251.
11. *Schaer S.* Stochastische Ionosphärenmodellierung beim Rapid Static Positioning GPS // *Diplomarbeit*, Astronomisches Institut, Universität Bern, Switzerland. — 1994.
12. *Standish E.* The Observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the astronomical almanac // *Astron. and Astrophys.* — 1990. — N 233 (1). — P. 252–271.
13. *Steigenberg P., Rothacher M., Fritsche M., Rulke A., Dietrich R.* Quality of reprocessed GPS satellite orbits // *J. Geodesy*. — 2009. — **83**, N 3-4. — P. 241–248.

Стаття надійшла до редакції 12.05.14

М. В. Ищенко

РЕПРОЦЕСИНГ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ
НА ПЕРМАНЕНТНИХ СТАНЦІЯХ РЕГІОНАЛЬНОЇ
МЕРЕЖІ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 935—1399

Наведено результати репроцесингу архівних GPS-спостережень, який виконано в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для періоду спостережень з 7 грудня 1997 р. до 4 листопада 2006 р. (464 GPS-тижні) для 31 GPS-станцій, розташованих на території Східної Європи (12 з яких — на території України). Вперше отримано однорідні координатні ряди в системі координат IGS05 і значення зенітної тропосферної рефракції для GPS-тижнів 935—1399, що вільні від ефектів, привнесених змінами в методиках обробки, моделях, априорних даних та програмному забезпеченні.

M. V. Ishchenko

REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS
AT PERMANENT STATIONS OF THE REGIONAL
NETWORK FOR GPS WEEKS 935—1399

We present our results of reprocessing of archival GPS observations which was performed at the GNSS data analysis centre of the MAO NAS of Ukraine for the observation period from 12 December 1997 to 4 November 2006 (464 GPS weeks) for 31 GPS stations located in the Eastern Europe (12 of them are located on the territory of Ukraine). Homogeneous coordinate solution in the IGS05 reference frame and values of zenith tropospheric refraction for the GPS weeks 935—1399 which are free from effects caused by changes in processing procedures, models, a priori data, and software are obtained for the first time.