

УДК 528.2:629.78

**О. А. Хода**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

**Центр анализа GPS-данных ГАО НАН Украины:  
результаты обработки наблюдений для GPS-недель  
1236—1399**

*В Центре анализа GPS-данных ГАО НАН Украины были обработаны наблюдения GPS-спутников на перманентных станциях, расположенных на Украине и в Восточной Европе. Обработка была выполнена с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2». Описана процедура обработки. Приведены вычисленные координаты станций для GPS-недели 1399. Показаны изменения значений координат и зенитной тропосферной рефракции для станций POLV и TRAB.*

*ЦЕНТР АНАЛІЗУ GPS-ДАНИХ ГАО НАН УКРАЇНИ: РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ GPS-ТИЖНІВ 1236—1399, Хода О. О. — У Центрі аналізу GPS-даних ГАО НАН України було оброблено спостереження GPS-супутників на перманентних станціях, розташованих в Україні та у Східній Європі. Обробку виконано за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 4.2». Описано процедуру обробки. Наведено обчислені координати GPS-станцій для GPS-тижня 1399. Показано зміни значень координат і зенітної тропосферної рефракції для станцій POLV та TRAB.*

*THE GPS DATA ANALYSIS CENTRE OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY: RESULTS OF OBSERVATION PROCESSING FOR GPS WEEKS 1236—1399, by Khoda O. A. — Observations of GPS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe were processed at the GPS Data Analysis Centre of the Main Astronomical Observatory. The processing was carried out with Bernese GPS Software ver. 4.2. The processing procedure is described. The obtained coordinates of GPS stations for GPS week 1399 are presented. Coordinate changes and zenith tropospheric refractions for POLV and TRAB stations are shown.*

## ВВЕДЕНИЕ

В декабре 2003 г. в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (ГАО НАН Украины) был создан Центр анализа GPS-данных для обработки наблюдений GPS-спутников на украинских и нескольких восточно-европейских перманентных станциях. Обработка проводилась в основном на компьютере «Pentium IV 3200 МГц», ОЗУ 1024 Мб, жесткий диск 400 Гб с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» [1] под операционной системой «Debian GNU/Linux 3.1».

Комплекс «Bernese GPS Software ver. 4.2» создан в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария) в ноябре 1999 г. Данный комплекс позволяет обрабатывать как кодовые, так и фазовые наблюдения ГНСС-спутников на пунктах как локального, так и регионального и глобального масштабов. В результате обработки можно получить с высокой точностью координаты ГНСС-станций, параметры орбит ГНСС-спутников, поправки к часам на спутниках и приемниках, тропосферную рефракцию и т. д. Ионосферную задержку возможно либо исключить путем создания безионосферной комбинации наблюдений на двух частотах, либо смоделировать с последующим использованием полученной модели при обработке данных.

Комплекс «Bernese GPS Software ver. 4.2» позволяет полностью автоматизировать обработку наблюдений ГНСС-станций перманентных сетей с помощью «Bernese Processing Engine».

В настоящее время комплекс «Bernese GPS Software» используется подавляющим большинством центров анализа Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN) и одним центром анализа Международной ГНСС-службы (IGS).

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные только GPS-наблюдений на 29 перманентных ГНСС-станциях (рис. 1) для GPS-недель 1236—1399 (14 сентября 2003 г. — 4 ноября 2006 г.), 12 из указанных станций расположены на территории Украины (см. табл. 1). На рис. 2 показана диаграмма наблюдений на данных станциях.

Для обработки использовались комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, полученные IGS [2], а также относительные вариации фазовых центров GPS-антенн, взятые из стандартного файла IGS ([ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs\\_01.pcv](ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs_01.pcv)). Океанические нагрузки для используемых станций были посчитаны по модели GOT00.2\_PP службой, созданной М.С. Босом (M. S. Bos) и Х.-Г. Шернеком (H.-G. Scherneck) в Космической обсерватории Онсала, Швеция (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>).

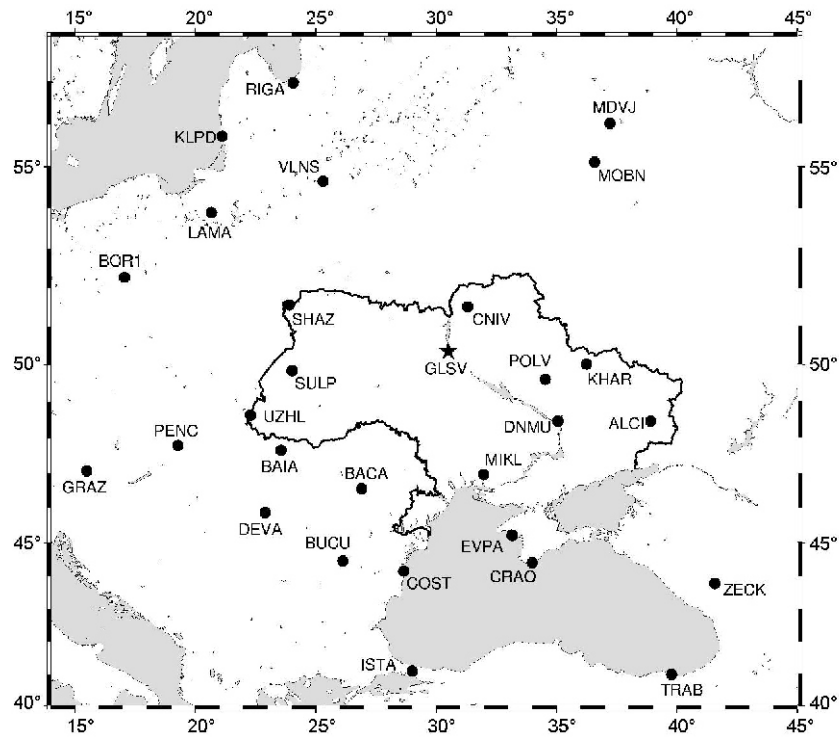


Рис. 1. Расположение GPS-станций

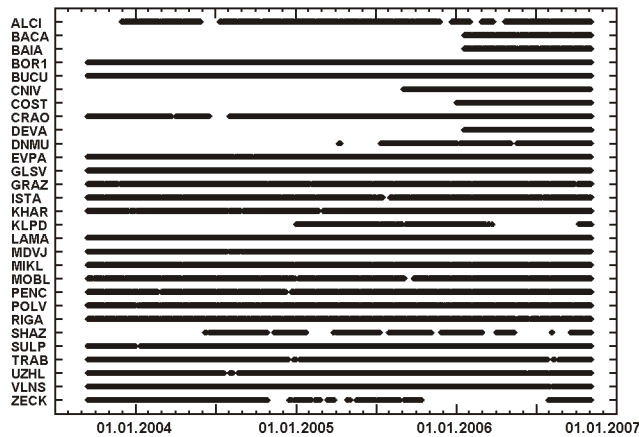


Рис. 2. Диаграмма наблюдений на GPS-станциях

В качестве априорных координат станций для текущей недели использовались координаты, полученные из обработки данных для предыдущей недели. Координаты и скорости станции GLSV на эпоху 1998.0 взяты из каталога IGS00b ([ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/coord/IGS03P33\\_RS106.snx](ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/coord/IGS03P33_RS106.snx)) — второй IGS-реализации ITRF2000:

$$\begin{aligned}
 X &= 3512889.0969 \text{ м}, & V_X &= -0.0190 \text{ м/год}, \\
 Y &= 2068979.7777 \text{ м}, & V_Y &= 0.0147 \text{ м/год}, \\
 Z &= 4888903.1494 \text{ м}, & V_Z &= 0.0066 \text{ м/год}.
 \end{aligned}$$

Таблица 1. Список станций

Станция	Страна	Идентификатор	Номер DOMES	Международные сети	Примечание	Антенна	Купол	Примечание
Киев/Голосеево	Украина	GLSV	12356M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Ужгород	Украина	UZHJ	12301M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Харьков	Украина	KHAR	12314M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Полтава	Украина	POLV	12336M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	NONE	
Николаев	Украина	MIKL	12335M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Львов	Украина	SULP	12366M001	IGS, EPN	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	
Симеиз	Украина	CRAO	12337M002	IGS, MGN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	SCIS	
Чернигов	Украина	CNIV	15501M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Евпатория	Украина	EVPA	12344M001	EPN	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	
Алчевск	Украина	ALCI	12371S001		TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Шацк	Украина	SHAZ	12370M001		TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Днепропетровск	Украина	DNMU	12369M001		TRIMBLE 7400MSI	TRM14532.00	NONE	
Менделеево	Россия	MDVJ	12309M005	IGS, EPN	JPS LEGACY	JPSREGANT_DD_E	NONE	
Обнинск	Россия	MOBN	12365M001	IGS	ASSTECH Z-XI3	ASH701945C_M	SCIS	
Зеленчукская	Россия	ZECK	12351M001	IGS, EPN	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/M_T	NONE	по 18.10.2005 00:00 UTC с 30.07.2006 00:00 UTC
Трабзон	Турция	TRAB	20808M001	IGS, EPN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936D_M	SNOW	
Стамбул	Турция	ISTA	20807M001	IGS, EPN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936D_M	SNOW	
Бухарест	Румыния	BUCU	11401M001	IGS, EPN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936D_M	SNOW	
Констанца	Румыния	COST	11407M001	EPN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936D_M	SNOW	
Баку	Румыния	BACA	11405M001	EPN	ASSTECH Z-X	ASH701945B_M	NONE	
Бая-Маре	Румыния	BAIA	11406M001	EPN	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Дева	Румыния	DEVA	11408M001	EPN	LEICA GRX1200PRO	LEIAT504	LEIS	
Грац	Австрия	GRAZ	11001M002	IGS, EPN, ECGN	ASSTECH UZ-12	ASH701945C_M	NONE	по 17.03.2005 09:00 UTC 17.03.200510:00UTC — 22.03.200510:50UTC с22.03.200510:50UTC
Пенц	Венгрия	PENC	11206M006	IGS, EPN	TRIMBLE NETRS	TRM29659.00	NONE	
Боровец	Польша	BORI	12205M002	IGS, EPN	TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	
Ольштын	Польша	LAMA	12209M001	IGS, EPN	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	NONE	
Вильнос	Литва	VLNS	10801M001	EPN, ECGN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936F_C	SNOW	
Клайпеда	Литва	KLPD	10802M001	EPN, ECGN	ASSTECH Z-XI3	ASH700936A_M	NONE	
Рига	Латвия	RIGA	12302M002	IGS, EPN, ECGN	ROGUE SNR-8000	ASH700936E	NONE	по 13.01.2005 00:30 UTC 13.01.200510:08UTC — 20.05.200606:00UTC 22.05.200600:00UTC — 17.06.200600:00UTC с18.06.200600:00UTC
					AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T	NONE	
					AOA BENCHMARK ACT	ASH700936D_M	NONE	
					ROGUE SNR-8000	ASH700936D_M	NONE	

Для каждой недели координаты станции GLSV приводились к средней эпохе наблюдений данной недели (среда, 11 ч 59 мин 45 с, время GPS).

## ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

До начала обработки осуществлялась проверка качества наблюдений с помощью программы TEQC [3]. По результатам этой проверки из обработки исключались станции с коротким интервалом наблюдений или с плохим качеством данных для обрабатываемой сессии.

При обработке наблюдений с помощью «Bernese GPS Software ver.4.2» использовались рекомендации EPN ([http://www.epncb.oma.be/\\_organisation/guidelines/guidelines\\_analysis\\_centres.php](http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php)) с одним исключением, которое будет упомянуто ниже.

Весь процесс обработки можно разделить на четыре этапа: предварительная обработка суточных сессий наблюдений, получение суточных решений, получение недельных решений и окончательная оценка параметров атмосферы.

Предварительная обработка была выполнена в следующей последовательности.

1. С помощью программы POLUPD файл параметров вращения Земли преобразовывался из формата IERS (Международной службы вращения Земли и референчных систем) во внутренний формат.

2. С помощью программы PRETAB файлы точных эфемерид GPS-спутников преобразовывались из земной системы координат IGS00b в небесную систему координат, отнесенную к эпохе J2000.0, и сохранялись в файле т. н. табличных орбит, формировался файл коррекций к часам GPS-спутников.

3. С помощью программы ORBGEN создавались файлы т. н. стандартных орбит путем интегрирования уравнений движения спутников, причем координаты спутников из файлов табличных орбит использовались как псевдонаблюдения. При интегрировании использовались гравитационная модель JGM3 и эфемериды Солнца, Луны и планет DE200 [7] от Лаборатории реактивного движения (JPL, США).

4. С помощью программы RXOBV3 файлы наблюдений были преобразованы из формата RINEX во внутренний бинарный формат.

5. С помощью программы CODSPR по кодовым наблюдениям были определены коррекции к часам приемников. Полученные коррекции в виде сдвигов показаний часов сохранялись в файлах фазовых наблюдений.

6. С помощью программы SNGDIF сформированы файлы первых разностей (базы). Базы задавались явно на основе расстояний между станциями и длительности сессий наблюдений на станциях.

7. С помощью программы MAUPRP проверено качество фазовых наблюдений в полученных файлах первых разностей, определены мо-

менты скачков фаз, замаркированы наблюдения GPS-спутников с углами места меньше  $10^\circ$  наблюдения на малых интервалах времени (меньше 6 мин) и т.д.

8. С помощью программы GPSEST получены решения на фазовой комбинации  $L3$  с действительными значениями фазовых неоднозначностей для неочищенных данных отдельно для каждой базы. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места  $10^\circ$  со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места спутника. Тропосферные параметры определялись каждый час для каждой станции. Использовалась опция DRY\_NIELL, задающая функцию наклона  $\text{nmfh2.0}$  [5]. Сохранялись файлы остатков.

9. С помощью программы RESRMS по данным файлов остатков были найдены выбросы в файлах первых разностей, которые были замаркированы с помощью программы SATMRK.

10. С помощью программы GPSEST построены региональные детерминистические модели ионосферы [6], основанные на разложении общего содержания электронов в ряд по сферическим гармоникам в зависимости от географической широты и часового угла Солнца, необходимые для определения фазовых неоднозначностей.

11. С помощью программы GPSEST получены решения на фазовой комбинации  $L3$  с действительными значениями фазовых неоднозначностей для очищенных данных. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места  $10^\circ$  со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. На координаты станции GLSV были наложены жесткие ограничения (0.1 мм). Тропосферные параметры определялись каждый час для каждой станции. Опция, задающая функцию наклона — DRY\_NIELL. Сохранялись файлы тропосферных параметров, которые использовались при определении фазовых неоднозначностей.

12. С помощью программы GPSEST были зафиксированы фазовые неоднозначности. Использовалась методика QIF [4]. Каждая база обрабатывалась независимо и одновременно на частотах  $L1$  и  $L2$ . Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места  $10^\circ$  со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Для лучшего определения фазовых неоднозначностей использовались региональные модели ионосферы, построенные на шаге 10, и тропосферные параметры, полученные на шаге 11. На рис. 3 показана доля  $f$  зафиксированных неоднозначностей для каждой сессии.

На следующем этапе получались суточные решения. С помощью программы GPSEST получены решения на фазовой комбинации  $L3$  с фиксированными фазовыми неоднозначностями. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места  $10^\circ$  со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места для всех эпох наблюдений, а не с рекомендованным EPN периодом выборки измерений 180 с. На координаты станции GLSV были наложены жесткие ограничения (0.1 мм). Если для данных суток сессия наблюдений на

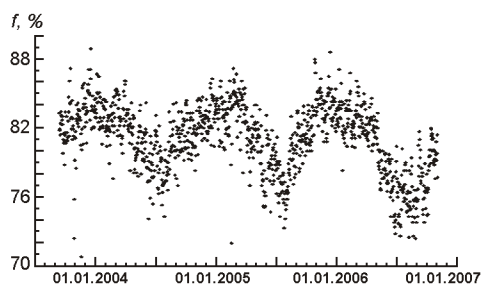


Рис. 3. Доля  $f$  зафиксированных неоднозначностей

станции GLSV была короткой, то жесткие ограничения накладывались также на координаты станций BOR1 и LAMA. Тропосферные параметры определялись каждый час для каждой станции. Опция, задающая функцию наклона — DRY\_NIELL. Сохранялись файлы нормальных уравнений.

После того как были получены суточные решения для всех дней недели, с помощью программы ADDNEQ проводилось уравнивание нормальных уравнений, сохраненных на предыдущем этапе. В результате получались финальные координаты для данной недели. Также сохранялись SINEX-файлы. На рис. 4 показаны количество наблюдений и количество оцениваемых параметров в недельных решениях. Значения апостериорной средней квадратичной ошибки измерения с весом единица составили 1.0—1.5 мм.

На последнем этапе запускалась программа GPSEST отдельно для каждого суток для окончательной оценки тропосферной рефракции на всех станциях. Решение получалось на фазовой комбинации  $L3$  с фиксированными фазовыми неоднозначностями. Использовались наблюдения спутников с минимальным углом места  $10^\circ$  со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Координаты всех станций фиксировались. Опция, задающая функцию наклона — DRY\_NIELL. Решение сохранялось в формате TROPEX.

В качестве теста с помощью программы GPSEST строились финальные региональные детерминистические модели ионосферы, аналогичные тем, что строились на шаге 10 предварительной обработки,

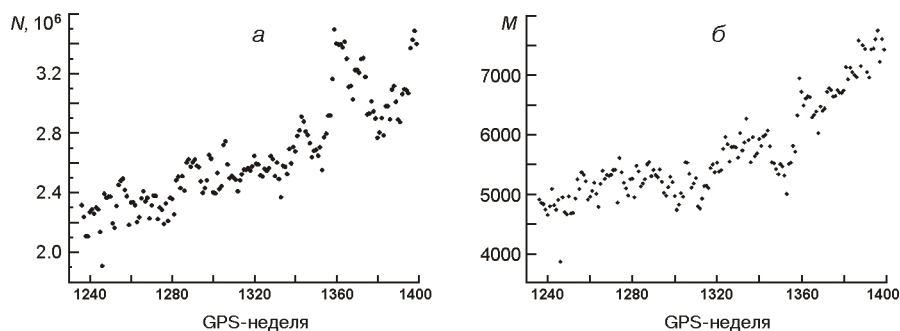


Рис. 4. Количество  $N$  наблюдений (а) и количество  $M$  оцениваемых параметров (б) в недельных решениях

но основывающиеся на координатах станций из финального недельного решения. Модели сохранялись в формате IONEX.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки были получены координаты GPS-станций сети для GPS-недель 1236—1399. В качестве примера в табл. 2 приведены значения вычисленных координат для GPS-недели 1399 (29 октября — 4 ноября 2006 г.). СКО полученных координат составляют 0.1—0.3 мм. Столь оптимистические значения СКО объясняются большим количеством уравнений наблюдений. Реальная же точность вычисленных координат на порядок больше, что подтверждается повторяемостью составляющих координат из суточных решений. На рис. 5 показаны изменения значений широты, долготы и высоты

**Таблица 2.** Решение для GPS-недели 1399 (система координат: IGS00b, эпоха: 1 ноября 2006 г. 11 ч 59 мин 45 с, время GPS)

Станция	X, м	Y, м	Z, м
ALCI	3297847.8991	2661607.4403	4750829.8147
BACA	3917524.9373	1988524.1385	4608585.6083
BAIA	3945839.7473	1720428.2989	4691082.7066
BORI	3738358.4242	1148173.7404	5021815.7682
BUCU	4093760.8323	2007793.8384	4445129.9636
CNIV	3397785.1901	2066990.5740	4969811.5792
COST	4021613.6719	2197896.3664	4421014.6970
CRAO	3783897.0762	2551404.4501	4441264.2779
DEVA	4097210.4623	1731870.4222	4556026.7497
DNMU	3468976.8857	2434669.3673	4750720.1259
EVPA	3767253.4568	2461876.3782	4504591.7961
GLSV	3512888.9275	2068979.9075	4888903.2068
GRAZ	4194423.7880	1162702.7270	4647245.4078
ISTA	4208830.2663	2334850.3341	4171267.2297
KHAR	3312984.2980	2428203.4647	4863307.8195
KLPD	3359228.1047	1297490.5062	5246690.3405
LAMA	3524522.8888	1329693.6576	5129846.3375
MDVJ	2845456.0421	2160954.2694	5265993.2091
MIKL	3698553.9572	2308676.0355	4639769.4886
MOBN	2936432.0143	2178364.5751	5208858.2319
PENC	4052449.4404	1417681.1584	4701407.0998
POLV	3411557.3138	2348464.0147	4834396.8819
RIGA	3183899.1674	1421478.5201	5322810.7977
SHAZ	3631977.9666	1609614.5174	4973373.0647
SULP	3765296.9666	1677559.2379	4851297.4079
TRAB	3705250.3273	3084421.7207	4162044.7610
UZHL	3907587.4278	1602428.7254	4763783.7561
VLNS	3343600.5859	1580417.7675	5179337.2877
ZECK	3451174.6663	3060335.4634	4391955.6377



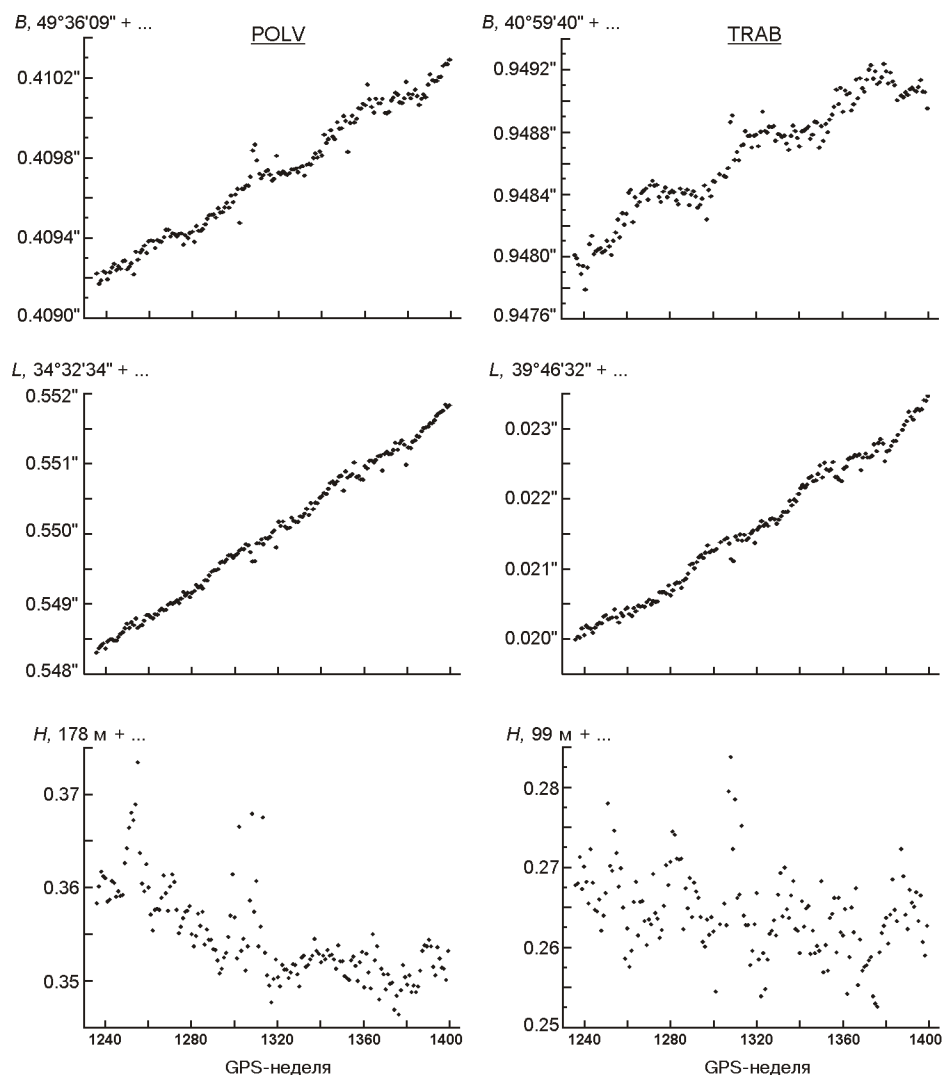


Рис. 5. Координаты (широта  $B$ , долгота  $L$ , высота  $H$ ) станций POLV и TRAB

для станций POLV (находящейся в середине сети) и TRAB (находящейся на окраине сети).

Наличие в обрабатываемой сети станций EPN (от 15 для GPS-недели 1236 до 21 для GPS-недели 1399) дало возможность сравнить полученные решения с комбинированными решениями Европейской перманентной ГНСС-сети путем определения параметров преобразования Гельмерта. Полученные значения параметров показаны на рис. 6. На рис. 7 представлены остатки после преобразования Гельмерта между полученными решениями и комбинированными решениями EPN для станций POLV и TRAB.

Также были получены значения зенитной тропосферной рефракции для всех станций сети. Полученные значения для станций POLV и TRAB показаны на рис. 8.

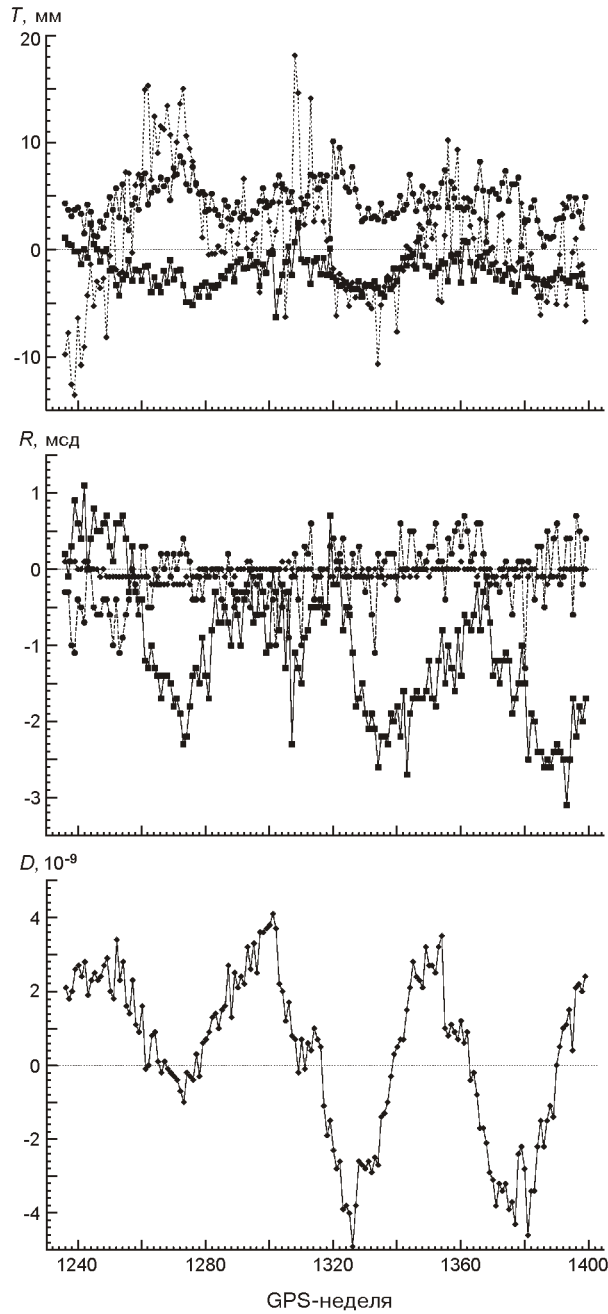


Рис. 6. Значения параметров преобразования Гельмерта (сдвиг  $T$ , вращение  $R$ , масштабный множитель  $D$ ) между полученными решениями и комбинированными решениями EPN (квадратики —  $X$ , точки —  $Y$ , ромбики —  $Z$ )

Полученные файлы решений в форматах SINEX и TROPЕХ будут размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/products/>).

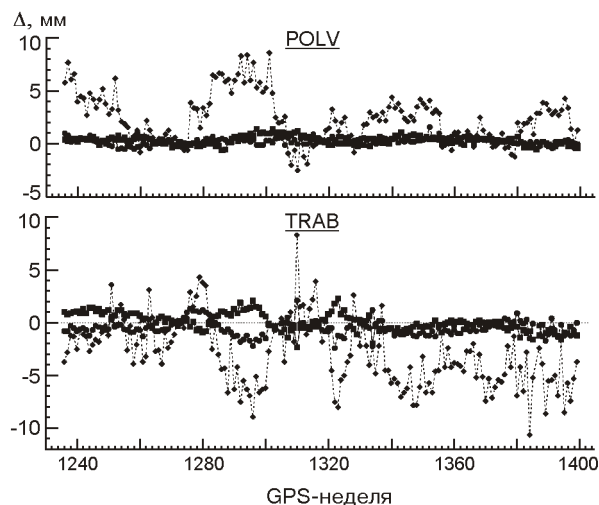


Рис. 7. Остатки после преобразования Гельмерта между полученными решениями и комбинированными решениями EPN для станций POLV и TRAB (квадратики — North, точки — East, ромбики — Height)

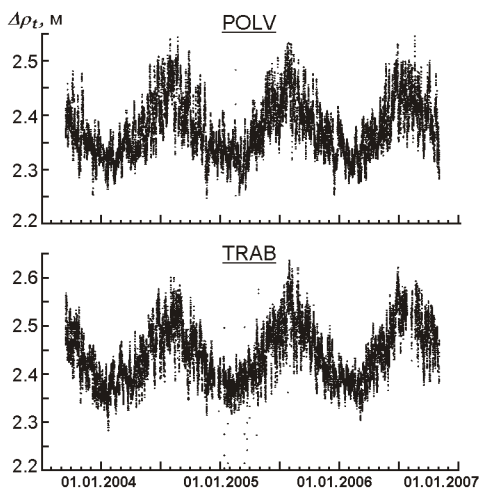


Рис. 8. Значения тропосферной рефракции в зените для станций POLV и TRAB

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» были обработаны наблюдения GPS-спутников на 29 перманентных станциях, расположенных на Украине и в Восточной Европе. Точность вычисленных координат составила приблизительно 3 мм, что соответствует точности координат, получаемых центрами анализа данных Международной ГНСС-сети.

Вычисленные параметры преобразования Гельмерта между полученными решениями и комбинированными решениями Европейской перманентной ГНСС-сети позволяют утверждать, что решения Центра анализа данных ГАО НАН Украины соответствуют по качеству комбинированным решениям EPN.

Кроме координат для станций сети также были определены значения зенитной тропосферной рефракции.

1. *Bernese GPS Software Version 4.2* / Eds U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2001.—515 p.
2. *Dow J. M., Neilan R. E., Gendt G.* The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade // *Adv. in Space Res.*—2005.— **36**, N 3.—P. 320—326.
3. *Estey L. H., Meertens C. M.* TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS Data // *GPS Solutions.*—1999.—**3**, N 1.—P. 42—49.
4. *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.
5. *Niell A. E.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *J. Geophys. Res.*—1996.—**101B**, N 2.—P. 3227—3246.
6. *Schaer S.* Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System // Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.—1999.—205 p.
7. *Standish E. M.* The observational basis for JPL's DE200, the planetary ephemerides of the astronomical almanac // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**233**, N 1.—P. 252—271.

Поступила в редакцию 12.06.09