

УДК 528.2:629.78

М. В. Ищенко, О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

РЕПРОЦЕССИНГ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ, ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1390—1399

Спостереження GPS-супутників на перманентних станціях, які розташовані на території України та Східної Європи, було оброблено за допомогою програмного забезпечення «Bernese GPS Software ver. 5.0» з використанням нових моделей та методик обробки, впроваджених IGS з GPS-тижня 1400. Визначені координати GPS-станцій для GPS-тижнів 1390—1399 порівнюються з координатами, отриманими в ході попередньої регулярної обробки цих даних.

В 1994 г. Международной геодезической ассоциацией была создана Международная ГНСС-служба (IGS). Главными задачами новой организации были проведение постоянных наблюдений GPS-спутников по единым стандартам и обеспечение пользователей точными эфемеридами ГНСС-спутников. С этого времени обработка ГНСС-наблюдений выполняется несколькими центрами анализа данных с использованием единых стандартов и методик с целью получения точных эфемерид ГНСС-спутников, коррекций к часам спутников, параметров вращения Земли и т. д. Финальное комбинированное решение получается путем объединения решений этих центров анализа ГНСС-данных. С течением времени используемые модели и методики обработки улучшались, что приводило к уменьшению погрешности получаемых продуктов. Так, на рис. 1 видно уменьшение погрешности оценки финальных эфемерид GPS-спутников, полученных в Центре анализа CODE.

Начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.) IGS вводит новые модели и методики обработки. Во-первых, рекомендуется вместо относительных использовать абсолютные модели вариаций фазовых центров комбинаций антенна-купол; во-вторых, рекомендуется использовать мо-

дель океанической нагрузки FES2004 [5] вместо GOT00.2_PP. 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).

В 2008 г. IGS начала кампанию репроцессинга (переобработки) архивных наблюдений с использованием новых моделей и методик обработки. Целью этой кампании было получение согласующегося ряда продуктов для всего периода наблюдений, в том числе точных эфемерид GPS-спутников, в системе координат IGS05 [8].

В Центре анализа ГНСС-наблюдений Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (ГАО НАН Украины) была выполнена регулярная обработка наблюдений спутников для GPS-недель 1236—1399 (14 сентября 2003 г. — 4 ноября 2006 г.) на 29 станциях, расположенных на территории Восточной Европы, 12 из которых — на территории Украины (рис. 2) [1]. Обработка была выполнена с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» [2] согласно требованиям Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), действующим до GPS-недели 1400. В результате выполненной обработки были получены координаты GPS-станций в системе отсчета IGS00b

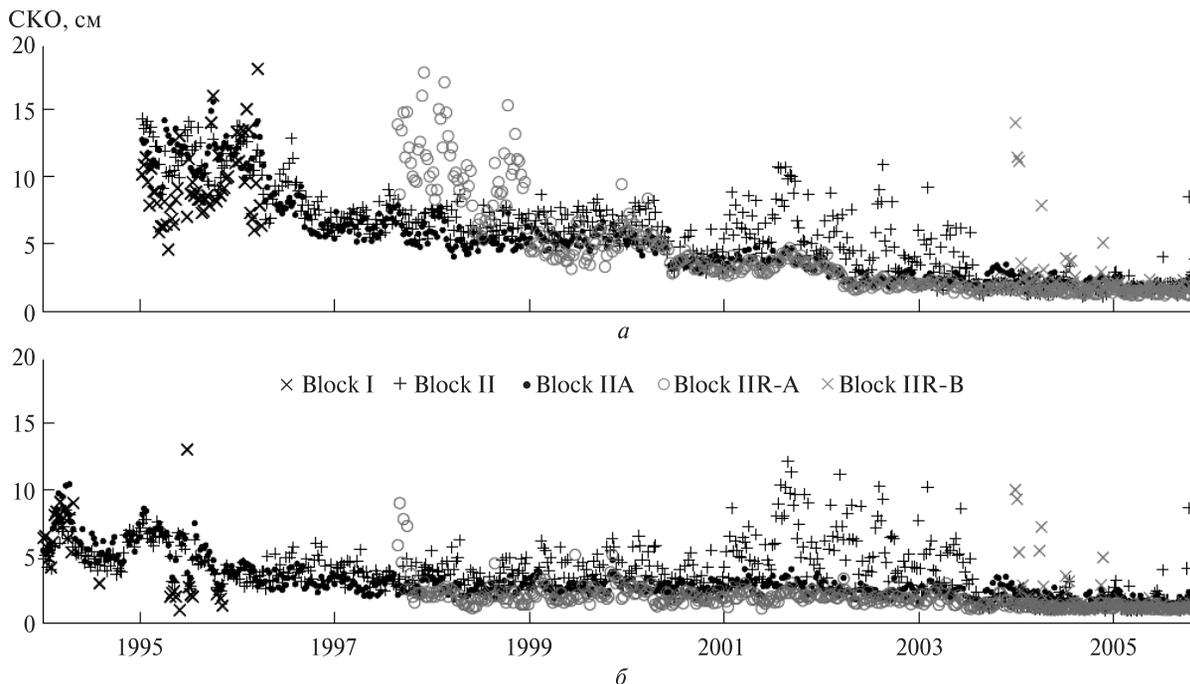


Рис. 1. Точность финальных эфемерид как результат регулярной обработки CODE и кампании репроцессинга IGS [8]

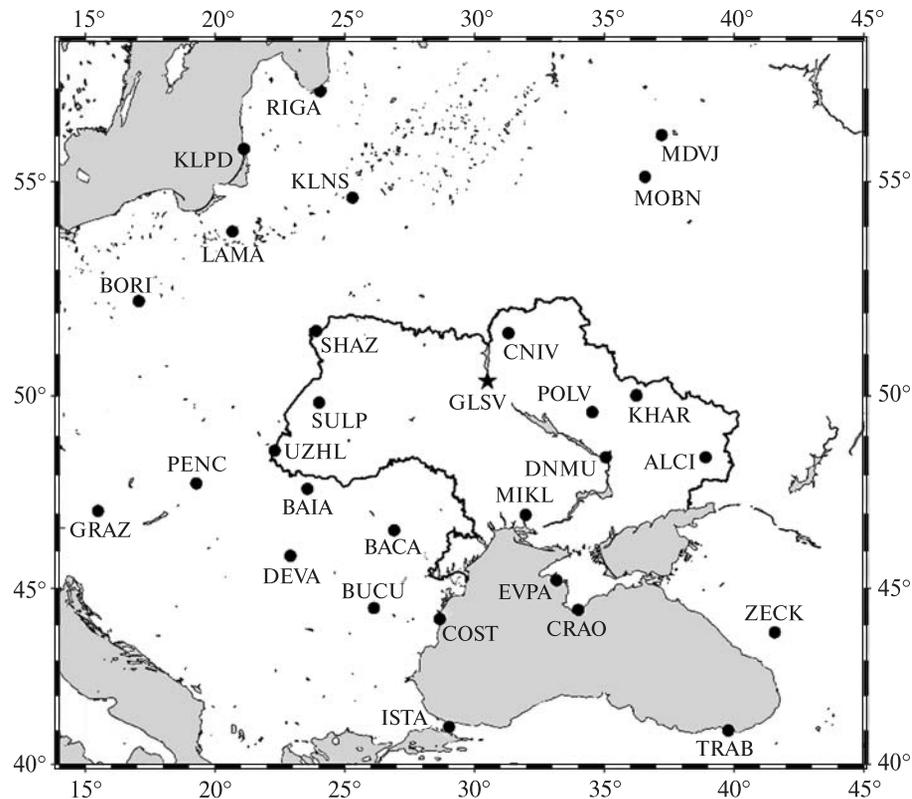


Рис. 2. Расположение GPS-станций, наблюдения которых использовались при репроцессинге

(вторая IGS-реализация ITRF2000) и значения зенитной тропосферной рефракции для каждой станции сети. Обозначим это решение как *MAO*.

Наличие точных эфемерид GPS-спутников в системе координат IGS05, полученных в результате кампании репроцессинга, выполненной IGS, дало возможность организовать репроцессинг архивных наблюдений GPS-спутников в соответствии с новыми рекомендациями EPN (www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf).

Цель данного репроцессинга — получить однородные ряды координат перманентных ГНСС-станций (прежде всего украинских) и сравнить полученные значения со значениями координат, полученными в ходе регулярной обработки.

В данной работе приведены первые результаты репроцессинга наблюдений GPS-спутников на 29 перманентных станциях для GPS-недель 1390—1399 (27 августа — 4 ноября 2006 г.), выполненных с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [3]. Диаграмма наблюдений на перманентных станциях показана на рис. 3. Чтобы исключить возможное влияние набора сформированных баз (первых разностей) на оценки координат станций, при репроцессинге использовались наборы баз из решения *MAO*. Для задания системы координат использовалось ограничение «No-Net Translation» (отсутс-

твие общего смещения) на координаты станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 и TRAB. Обозначим полученное решение как *MA1*. Основные различия между моделями и априорными данными, использовавшимися для получения решений *MAO* и *MA1*, приведены в табл. 1.

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на четыре этапа:

- 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.

Основными входными данными на этапе предварительной обработки служили:

- наблюдения GPS-спутников, зафиксированные на перманентных станциях, в формате RINEX;
- комбинированные точные эфемериды GPS-спутников, полученные в результате кампании репроцессинга IGS;
- параметры вращения Земли, согласующиеся с точными эфемеридами GPS-спутников;
- солнечно-лунные эфемериды DE200, предоставляемые Лабораторией реактивного движения (JPL);

Таблица 1. Основные модели и априорные данные для решений *MAO* и *MA1*

	Решение <i>MAO</i>	Решение <i>MA1</i>
Система координат точных эфемерид	IGS00b	IGS05
Система координат 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 GLSV, POLV, MDVJ, BOR1, TRAB
Модель океанической нагрузки	GOT00.2_PP	FES2004
Модель ионосферы	Формируется во время обработки	CODE
Априорная модель тропосферы	Не используется	DRY_NIELL
Модели калибровки фазовых центров комбинаций антенна — купол	Относительные	Абсолютные
Минимальный угол места GPS-спутников	10°	3°



Рис. 3. Диаграмма наблюдений GPS-спутников

• DCB-файлы, предоставляемые CODE, и содержащие оценки разностей кодовых наблюдений для каждого GPS-спутника.

В качестве априорных координат использовались координаты из каталога IGS05, из файла решения для предыдущего дня (для станций, которых нет в каталоге IGS05) или из заголовков RINEX-файлов (для новых станций).

На этапе предварительной обработки сначала выполнялась проверка качества наблюдений на уровне RINEX-файлов и преобразование входных данных во внутренние форматы. После этого в рамках предварительной обработки кодовых наблюдений (SPP) оценивались поправки к часам приемников, расположенных на GPS-станциях. Файлы первых разностей формировались согласно набору баз из решения MAO, как было указано выше. Предварительная обработка фазовых наблюдений позволила определить моменты скачков фазы, выявить выбросы, малые интервалы наблюдения и наблюдения спутников с углом места меньше 3° , которые маркировались на следующем шаге. Спутники с большим количеством маркированных наблюдений исключались из обработки. Также исключались

из обработки станции, содержащие большое количество плохих наблюдений.

На следующем этапе получались суточные решения с действительными значениями фазовых неоднозначностей. Наряду с этим выполнялась оценка параметров тропосферы. Фиксирование фазовых неоднозначностей выполнялось с помощью методики QIF [6]. При этом использовалась глобальная модель ионосферы, предоставляемая CODE, и тропосферные параметры, полученные на предыдущем шаге обработки.

На втором этапе выполнялась обработка наблюдений с фиксированными фазовыми неоднозначностями с целью получить нормальные уравнения. Зенитная тропосферная задержка оценивалась с использованием априорной модели. После уравнивания выполнялась проверка качества оценки координат референчных станций. Параметры преобразования Гельмerta (только сдвиг) между системой координат, которая задавалась полученными координатами референчных станций, и системой координат, задаваемой координатами референчных станций из каталога IGS05, должны были быть равными нулю в пределах ошибок. Если остатки после

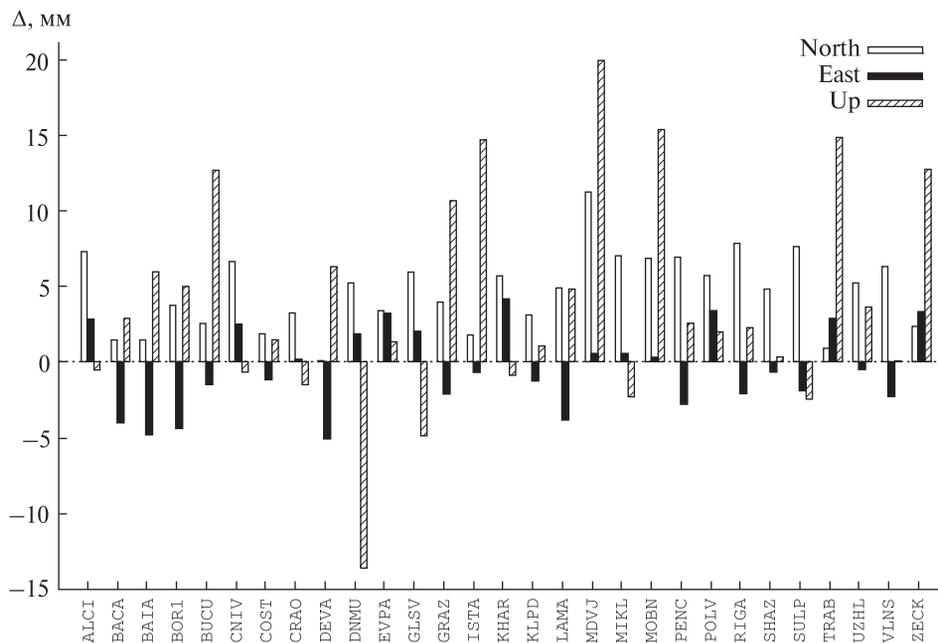


Рис. 4. Средние разности координат между решениями MA1 и MAO

преобразования для какой-либо компоненты координат какой-нибудь станции превышали задаваемые максимальные значения, то эта станция исключалась из списка референчных станций для этого дня, и выполнялось повторное уравнивание с использованием уменьшенного количества референчных станций. Финальное уравнивание позволяло получить оценки координат для суточных решений и нормальные уравнения. Результаты сохранялись также в формате SINEX.

После того как были получены решения для всех дней недели, проводилось уравнивание суточных файлов нормальных уравнений. Задание системы координат и проверка качества оценки координат референчных станций выполнялись аналогично, как и для суточного решения.

На последнем этапе выполнялась финальная оценка зенитной тропосферной рефракции отдельно для каждого суток. При этом фиксировались координаты всех станций, полученные на третьем шаге.

Так как для решения MAO координаты были оценены в системе координат IGS00b, а для решения MA1 — в системе координат IGS05, то для сравнения полученных координат было необходимо преобразовать координаты для реше-

ния MAO из системы IGS00b в IGS05. Преобразование было выполнено с помощью сервиса, предоставляемого на сайте Европейской перманентной ГНСС-сети (http://www.epncb.oma.be/_dataproducs/coord_trans/).

На рис. 4 показаны средние разности координат перманентных станций между решениями MA1 и MAO для северной, восточной и высотной составляющих. Для прямоугольных координат значения средних разностей составили от -5.0 до 4.1 мм по оси X, от 0.1 до 10.4 мм по оси Y, от -13.7 до 19.8 мм по оси Z. Наименьшие разности прямоугольных координат получены для станции COST (Констанца, Румыния): 0.1, 2.1 и 1.8 мм, а наибольшие — для станции MDVJ (Менделеево, Россия): 0.4, 12.8 и 19.8 мм по осям X, Y и Z соответственно.

Наличие двух решений MAO и MA1 в единой системе координат позволило найти параметры

Таблица 2. Диапазон значений параметров преобразований Гельмерта между решениями MAO и MA1

Смещение, мм		Вращение, мсд		Масштабный множитель, 10 ⁻⁹
X	от -22.2 до 1.1	X	от -0.97 до 0.22	
Y	от -25.6 до 20.5	Y	от -0.05 до 0.64	
Z	от -29.6 до 19.5	Z	от -0.54 до 0.30	

Гельмерта между решениями для каждой GPS-недели (рис. 5). Минимальные и максимальные значения полученных параметров приведены в табл. 2.

Остатки после преобразования Гельмерта позволяют получить информацию о влиянии перехода от относительных к абсолютным моделям вариаций фазовых центров комбинаций антенна — купол на координаты GPS-станций.

В табл. 3 приведены средние значения остатков между решениями МА1 и МА0 (обозначено как М1) для высотной составляющей для каждой комбинации антенна — купол. Для сравнения также приведены остатки для высотной составляющей после преобразований Гельмерта между решениями с абсолютными и относи-

Таблица 3. Остатки высотной компоненты после преобразований Гельмерта

Антенна — купол	Количество станций	$U \pm dU$, мм
AOAD/M_T NONE	1 (M1)	8.58 ± 1.56
	14 (B3)	-0.89 ± 7.51
AOAD/M_T SCIS	1 (M1)	-6.29 ± 1.47
	N/A	N/A
ASH700936A_M NONE	1 (M1)	-3.25 ± 1.06
	3 (B3)	1.14 ± 3.57
ASH700936D_M NONE	1 (M1)	-0.77 ± 0.91
	1 (B3)	8.80 ± 5.94
ASH700936D_M SNOW	4 (M1)	8.58 ± 1.56
	8 (B3)	13.54 ± 10.39
ASH700936E NONE	1 (M1)	0.46 ± 0.79
	1 (B3)	-1.77 ± 1.81
ASH700936F_C SNOW	1 (M1)	1.57 ± 1.09
	N/A	N/A
ASH701945B_M NONE	1 (M1)	-3.14 ± 1.37
	4 (B3)	-2.59 ± 3.55
ASH701945C_M SCIS	1 (M1)	11.87 ± 1.05
	N/A	N/A
JPSREGANT__DD_E NONE	1 (M1)	16.50 ± 1.10
	3 (B3)	12.49 ± 7.08
LEIAT504 LEIS	3 (M1)	0.90 ± 1.83
	17 (B3)	-10.86 ± 3.15
TRM14532.00 NONE	1 (M1)	-17.86 ± 0.83
	2 (B3)	-10.56 ± 1.92
TRM29659.00 NONE	7 (M1)	-2.40 ± 4.56
	36 (B3)	1.12 ± 5.72
TRM41249.00 NONE	5 (M1)	-4.19 ± 2.41
	6 (B3)	-4.13 ± 3.78

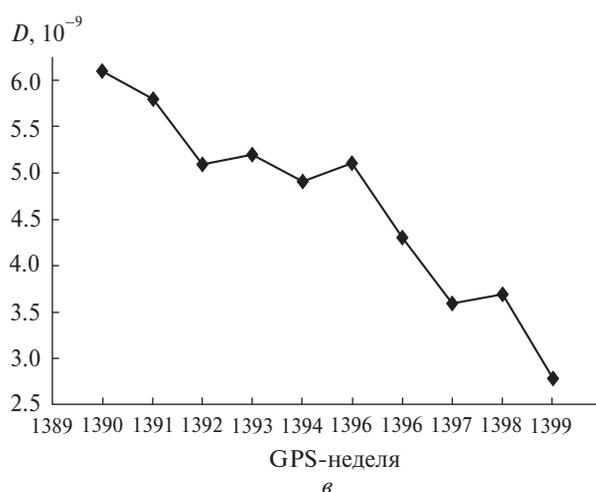
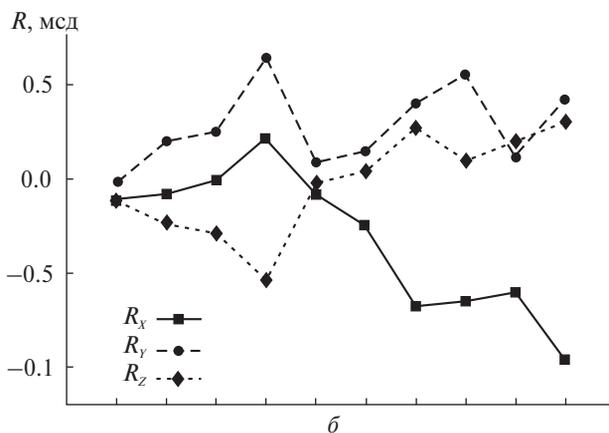
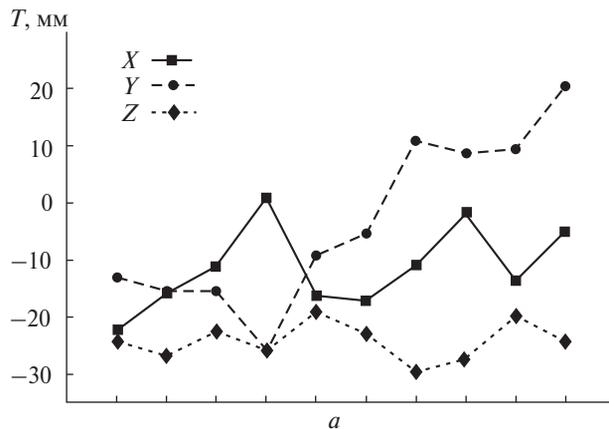


Рис. 5. Параметры преобразований Гельмерта между решениями МА1 и МА0: a — смещение, b — вращение, v — масштабный множитель

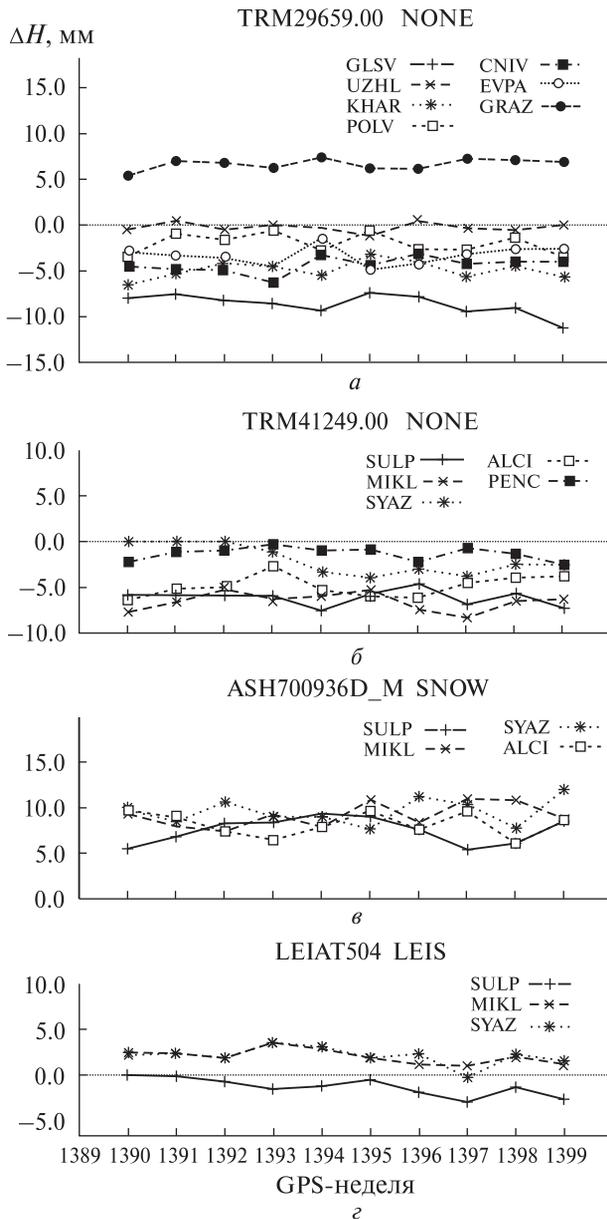


Рис. 6. Значения остатков для высотной компоненты после преобразований Гельмерта между решениями *MA0* и *MA1*

тельными моделями вариаций фазовых центров комбинаций антенна — купол для региональной сети из работы [4] (обозначено как *B3*). Видно, что средние значения остатков для большинства комбинаций антенна — купол близки, значительные различия значений наблюдаются в случаях больших отличий количества станций

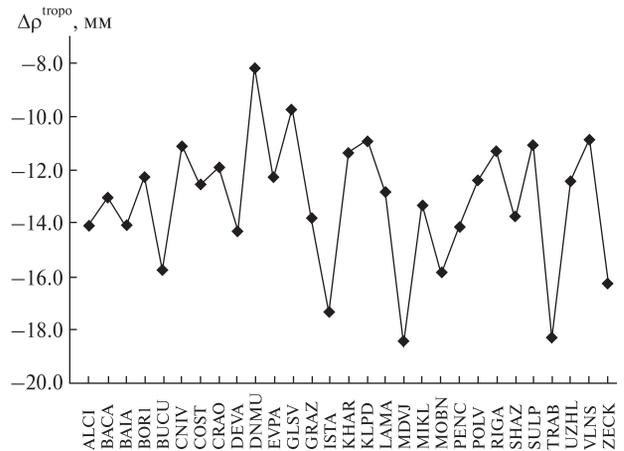


Рис. 7. Средние значения разностей зенитной тропосферной рефракции для станций сети

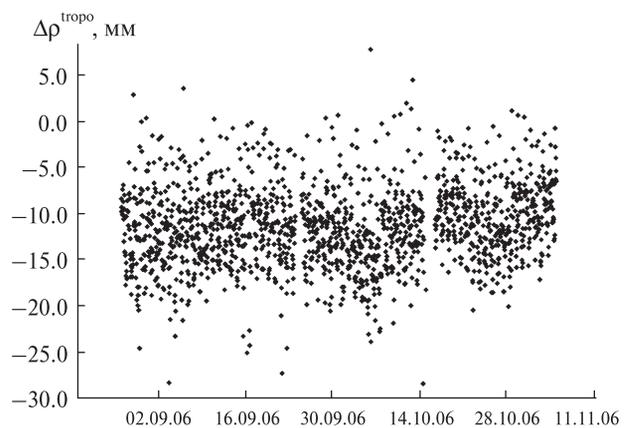


Рис. 8. Средние значения разностей зенитной тропосферной рефракции для GPS-станции KHAR

для одной и той же комбинации антенна — купол. На рис. 6 показаны остатки для высотной составляющей для комбинаций антенна — купол, наиболее часто используемых в данной сети. Полученные результаты дают основания утверждать, что несмотря на различие используемых моделей и разных методик для регулярной обработки и репроцессинга, основной вклад в разности координат привнесен изменением использованных моделей вариаций фазовых центров комбинаций антенна — купол (абсолютных вместо относительных).

Оценка тропосферной рефракции рассчитывается по формуле

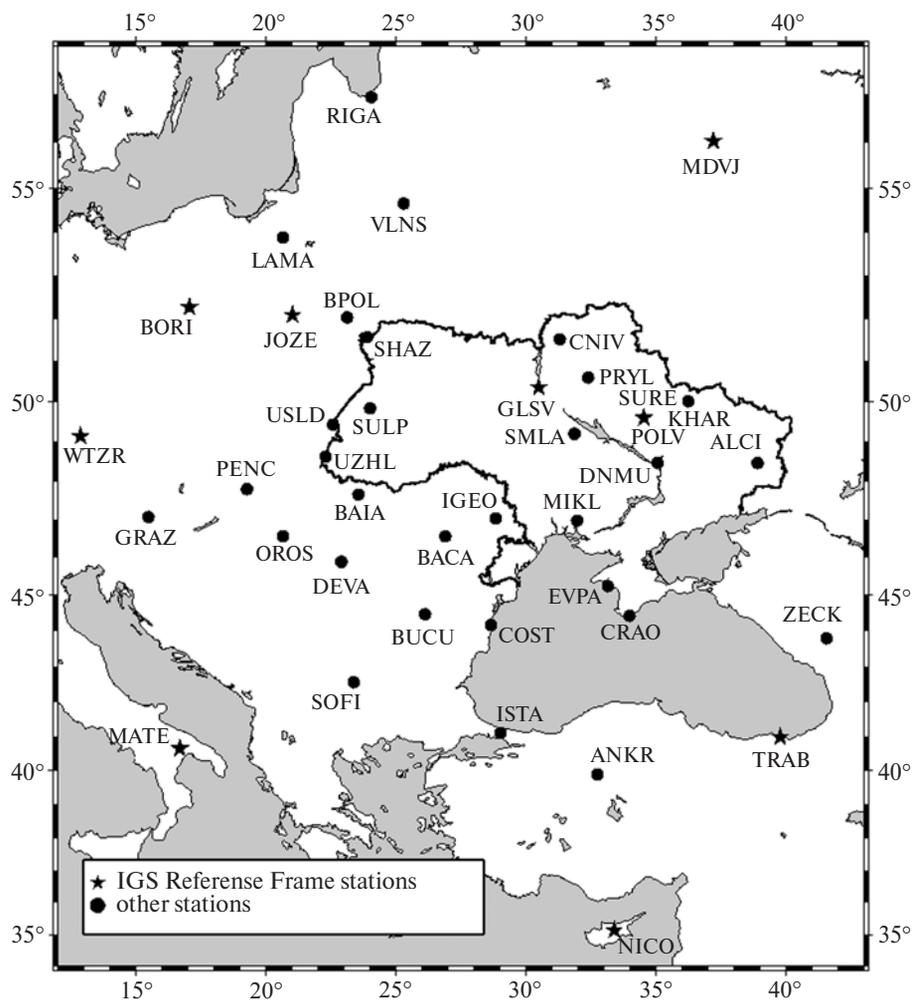


Рис. 9. Расположение ГНСС-станций, наблюдения которых используются при регулярной обработке

$$\Delta\rho_R^S = f_{apr}(Z_R^S)\Delta\rho_{apr,R} + f(Z_R^S)\Delta\rho_R(t) + \Delta\rho_{hg}(Z_R^S, A_R^S, t),$$

где $\Delta\rho_R^S$ — тропосферная рефракция для спутника S на станции R , $\Delta\rho_{apr,R}$ — зенитная тропосферная рефракция (ZTD) в соответствии выбранной априорной модели, $f_{apr}(Z_R^S)$ — функция наклоения для априорной модели, Z_R^S и A_R^S — зенитное и азимутальное расстояния спутника S на станции R , $\Delta\rho_R(t)$ — оцениваемая зенитная тропосферная рефракция на станции R (зависит от времени), $f(Z_R^S)$ — функция наклоения для оцениваемого параметра ZTD, $\Delta\rho_{hg}(Z_R^S, A_R^S, t)$ — горизонтальный тропосферный градиент для учета азимутальной асиммет-

рии локальной тропосферы (зависит от времени, зенитного и азимутального расстояний спутника S на станции R).

Для получения решения *MA0* априорная модель тропосферы не использовалась и не выполнялась оценка тропосферного градиента. Для задания функции наклоения *nmfh2.0* [7] использовалась опция *DRY_NIELL*.

В решении *MA1* для задания априорной модели использовалась опция *DRY_NIELL*, которая задавала модель Саастамойнена и функцию наклоения *nmfh2.0*. Для задания функции наклоения оцениваемого параметра ZTD использовалась опция *WET_NIELL*. При определении параметра ZTD, рассчитываемый по априорной модели сухой компонент и оцениваемый влаж-

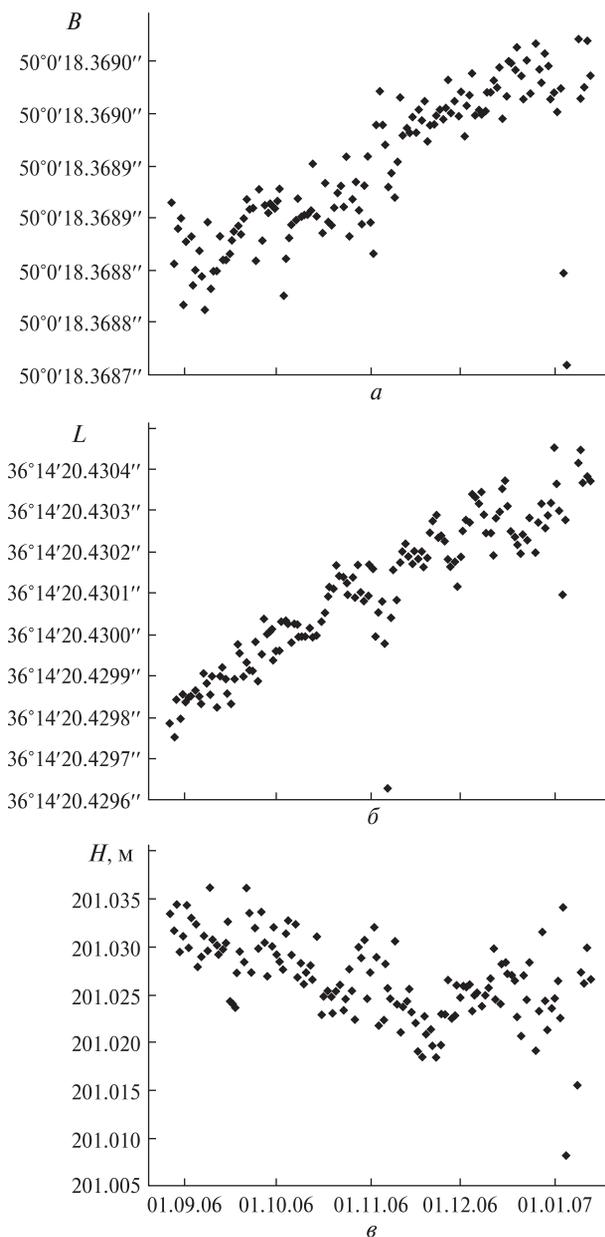


Рис. 10. Изменения координат GPS-станции КНАР: *a* — широта, *b* — долгота, *в* — высота

ный компонент (с использованием функций WET_NIELL и DRY_NIELL) должны согласовываться между собой. Для получения тропосферного градиента задавалась опция TILTING, что позволило использовать наблюдения со спутников с низкими углами места.

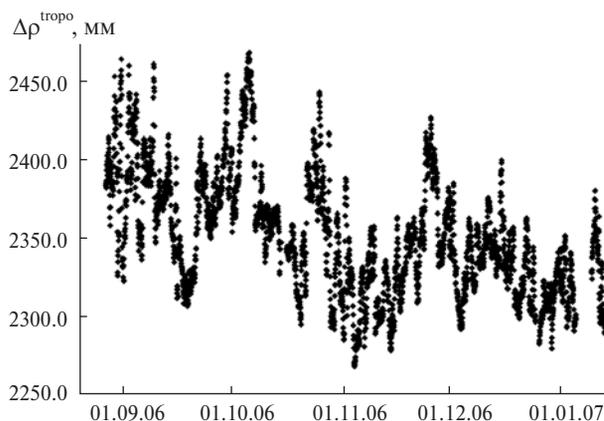


Рис. 11. Зенитная тропосферная рефракция на GPS-станции КНАР

На рис. 7 показаны средние значения разностей тропосферной рефракции между решениями *MA1* и *MA0*. Значения лежат в диапазоне от -18.45 (для станции MDVJ, Менделеево, Россия) до -8.18 мм (для станции DNMU, Днепропетровск, Украина). На рис. 8 представлены средние разности тропосферной рефракции для станции КНАР. Видно, что разности лежат в основном диапазоне от -5 до -20 мм.

В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины выполняется регулярная обработка ГНСС-наблюдений с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» согласно текущим требованиям EPN. Обработываются наблюдения на 41 станции, расположенных на территории Восточной Европы (рис. 9), начиная с GPS-недели 1400 (5 ноября 2006 г.). Координаты станций оцениваются в системе координат IGS05. Таким образом, схема данной обработки отличается от схемы представленного репроцессинга лишь количеством станций, включенных в обработку (т. е. геометрией сети). Кроме того, в данную регулярную обработку, в отличие от репроцессинга, включены наблюдения ГЛОНАСС-спутников.

Для оценки качества полученных результатов репроцессинга (координат станций и значений зенитной тропосферной рефракции на станциях) временные ряды координат и ZTD проверены на разрыв в момент начала GPS-недели 1400. Для этого взяты оценки координат станций и

ZTD из регулярной обработки Центра анализа для GPS-недель 1400—1409 (5 ноября 2006 г. — 21 января 2007 г.). Диаграмма наблюдений на станциях, которые также использовались при репроцессинге, представлена на рис. 3. Характерные временные ряды координат станций и зенитной тропосферной рефракции для станции КНАР (Харьков, Украина) показаны на рис. 10 и 11 соответственно. Видно, что разрывов в указанный момент не было. Небольшие изменения поведения временных рядов, скорее всего, вызваны различными геометриями сетей перманентных станций и формированием другого набора файлов первых разностей для регулярной обработки.

Итак, можно сделать следующие выводы. Хотя для получения решений МА1 и МА0 использовались разные модели и методики обработки (например, различные модели океанических нагрузок, различные способы задания систем координат и т. д.), основной вклад в изменения координат GPS-станций привнесено изменением использованных моделей вариаций фазовых центров комбинаций антенна — купол (абсолютных вместо относительных).

Использование горизонтального тропосферного градиента позволяет учитывать наблюдения низких GPS-спутников, что дало возможность улучшить оценку параметров зенитной тропосферной рефракции.

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. *Bernese GPS Software Version 4.2* / Eds U. Hugentobler, P. Fridez, S. Schaer. — Berne: Astron. Institute, University of Berne, 2001. — 515 p.
3. *Bernese GPS Software Version 5.0* / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astron. Institute, Univ. of Berne, 2007. — 612 p.
4. *Khoda O., Bruyninx C.* Switching from Relative to Absolute Antenna Phase Center Variations in a Regional Network: Stability of the Coordinates Differences // Mitteilungen des BKG. — 2009. — 42, EUREF Publ. N 17. — P. 331—334.
5. *Lyard F., Lefèvre F., Letellier T., Francis O.* Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004 // Ocean Dynamics. — 2006. — 56. — P. 394—415.
6. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System: PhD thesis // Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. — 1995. — 53. — 155 p. — (Astronomical Institute, Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern).
7. *Niell A.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // Geophys. J. Res. — 1996. — 202D, N 2. — P. 3227—3246.
8. *Steigenberger P., Rothacher M., Fritsche M., et al.* Quality of reprocessed GPS satellite orbits // J. Geodesy. — 2008. — 83, N 3-4. — P. 241—248.

Надійшла до редакції 09.06.11

M. V. Ischenko, O. A. Khoda

REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS AT PERMANENT STATIONS OF REGIONAL NETWORK FOR GPS WEEKS 1390—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 IGS since GPS week 1400. Estimated coordinates of GPS stations for GPS weeks 1390—1399 are compared with the GPS station coordinates obtained from the previous regular processing.