

УДК 528.2:629.78

О. А. Хо́да

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ: GPS VS GPS + ГЛОНАСС

Координати 71 перманентної станції, розташованої у середніх широтах Східної Європи, було отримано як з використанням спостережень лише GPS-супутників, так і з використанням GPS- та ГЛОНАСС-супутників. На основі порівняння повторюваності складових визначених координат GPS/ГЛОНАСС-станцій зроблено висновок, що на даний момент включення ГЛОНАСС-супутників в обробку спостережень перманентних станцій, розташованих у цьому регіоні, не покращує точності отриманих координат.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием орбитальной группировки спутников ГЛОНАСС всё чаще на перманентных ГНСС-станциях стали использоваться двухсистемные приёмники. Увеличение количества наблюдаемых ГНСС-спутников на станции приводит к увеличению числа уравнений при обработке наблюдений. Естественно, возникает вопрос, приведёт ли использование наблюдений ГЛОНАСС-спутников к улучшению оценки координат станций.

Стоит отметить, что сегодня точность комбинированных точных эфемерид Международной ГНСС-службы (IGS) для ГЛОНАСС-спутников приблизительно в два раза хуже, чем для GPS-спутников (менее 5.0 см против приблизительно 2.5 см). Кроме этого, поправки для часов ГЛОНАСС-спутников пока не оцениваются IGS, а в файлы точных эфемерид записываются значения из переданных эфемерид. Точность же оценки поправок часов GPS-спутников составляет менее 0.1 нс [3].

ОПИСАНИЕ СЕТИ

Для исследования влияния использования наблюдений ГНСС-спутников при обработке дан-

ных перманентных станций была выбрана сеть, состоящая из 71 станции, расположенной на востоке Европы — от южной Финляндии до Кипра и от восточной Германии до Подмосковья. Схема расположения ГНСС-станций показана на рис. 1.

30 станций выбранной сети расположены в Украине. Семь из них установлены ГАО НАН Украины (GLSV, KNAR, UZHL, EVPA, CNIV, SMLA, KTVL), четыре — НИИ геодезии и картографии (POLV, MIKL, ALCI, SULP). 12 станций входят в сеть Системы координатно-временного и навигационного обеспечения Украины (KHRS, LGRS, CHRS, FDRS, SVRS, EVRS, KRRS, VNRS, DNRS, MKRS, JVRS, KIRS), пять — в сеть ZAKPOS (MUKA, HUST, RANI, MIZG, VBER). Также в обработку были включены наблюдения на станциях Харьковского национального университета радиоэлектроники (SURE) и UNAVCO (CRAO). Полный список украинских ГНСС-станций с указанием установленного на них оборудования приведён в табл. 1.

Сеть является смешанной, в неё включены как GPS/ГЛОНАСС-станции (всего 37 станций, из них 17 расположены в Украине), так и станции, регистрирующие наблюдения только GPS-спутников. Десять станций сети (BOR1, GLSV, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, METS, POLV, POTS, WTZR) входят в список IGS Reference Frame Stations.

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для обработки была выбрана GPS-неделя 1561 (6—12 декабря 2009 г., дни года 340—346). Обработку было выполнено в ГАО НАН Украины с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [1] в соответствии с требованиями Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN) [4].

Было получено два варианта решений. В первом варианте обрабатывались наблюдения только GPS-спутников. Полученное решение обозначено как *MAO(G)*. Во втором варианте обрабатывались наблюдения как GPS-, так и ГЛОНАСС-спутников. Данное решение обозначено как *MAO(M)*. Остальные исходные данные и алгоритм обработки были идентичны для обоих вариантов решений.



Рис. 1. Расположение ГНСС-станций

В качестве исходных данных использовались:

- наблюдения ГНСС-спутников, зафиксированные на перманентных станциях, в формате RINEX;

- комбинированные точные эфемериды ГНСС-спутников, полученные 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) [6];

- так называемые DCB-файлы, предоставляемые Центром определения орбит в Европе (CODE), содержащие оценки разностей кодовых наблюдений для каждого ГНСС-спутника.

Априорные координаты референчных станций (станций из списка IGS Reference Frame Stations) брались из каталога IGS05, координаты других станций для первого дня недели брались из заголовков RINEX-файлов, для остальных дней — из файла решения для предыдущего дня.

Система координат IGS05 задавалась путём ограничения No-Net Translation на координа-

Таблица 1. Список украинских ГНСС-станций (на 12 декабря 2009 г.)

Идентификатор	Станция	Номер DOMES	Приёмник	Антенна	Купол	ГНСС	Сети
ALCI	Алчевск	12371S001	TRIMBLE 5700	TRM41249.00	NONE	GPS	EPN
CHRS	ККС Чернигов		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
CNIV	Чернигов	15501M001	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	GPS	EPN
CRAO	Симеиз	12337M002	ASHTech UZ-12	ASH701945C_M	SCIS	GPS	IGS,MGN
DNRS	ККС Дунаевцы		NOV OEM4-G2	NOV702	NONE	GPS	СКХОУ
EVPA	Евпатория	12344M001	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	GPS	EPN
EVRS	ККС Евпатория		NOV OEM4-G2	NOV702	NONE	GPS	СКХОУ
FDRS	ККС Феодосия		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
GLSV	Киев/Голосеево	12356M001	NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	IGS, EPN
HUST	Хуст		TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE	GPS+ГЛОНАСС	ZAKPOS
JVRS	Яворов		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
KHAR	Харьков	12314M001	NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	IGS, EPN
KHRS	ККС Харьков		NOV OEM4-G2	NOV503+CR	SPKE	GPS	СКХОУ
KIRS	ККС Киев		NOV OEM4-G2	NOV702	NONE	GPS	СКХОУ
KRRS	ККС Кировоград		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
KTVL	Кацивели	12337M003	NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	
LGRS	ККС Луганск		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
MIKL	Николаев	12335M001	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	GPS	IGS, EPN
MIZG	Межгорье		TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE	GPS+ГЛОНАСС	ZAKPOS
MKRS	ККС Мукачево		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
MUKA	Мукачево		TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE	GPS+ГЛОНАСС	ZAKPOS
POLV	Полтава	12336M001	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	NONE	GPS	IGS, EPN
RAHI	Рахов		TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE	GPS+ГЛОНАСС	ZAKPOS
SMLA	Смела	15503M001	NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	EPN
SULP	Львов	12366M001	TRIMBLE 4700	TRM41249.00	NONE	GPS	IGS,EPN
SURE	Харьков/ХНУРЭ	15504M001	NOV OEM4-G2	NOV702_4.00	NONE	GPS	
SVRS	ККС Севастополь		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ
UZHL	Ужгород	12301M001	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	NONE	GPS	IGS, EPN
VBER	Великий Березный		TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	NONE	GPS+ГЛОНАСС	ZAKPOS
VNRS	ККС Винница		NOV OEMV3	NOV702GG	NONE	GPS+ГЛОНАСС	СКХОУ

ты референчных станций (BOR1, GLSV, JOZE, MATE, MDVJ, NICO, METS, POLV, POTS, WTZR) из соответствующего каталога.

Обработка была выполнена в следующей последовательности.

1. Предварительная обработка суточных сесий наблюдений.

а) Проверка качества наблюдений на уровне RINEX-файлов, исключение из обработки станций с малым количеством наблюдений.

б) Преобразование входных данных во внутренние форматы.

в) Предварительная обработка кодовых наблюдений (SPP), оценка поправок к часам приёмников, расположенных на ГНСС-станциях.

г) Формирование файлов первых разностей (баз).

д) Предварительная обработка фазовых наблюдений, определение моментов скачков фазы, выявление выбросов, малых интервалов наблюдений и наблюдений спутников с углом места меньше 3° .

е) Маркировка выбросов, малых интервалов наблюдений и наблюдений спутников с углом места меньше 3° .

ж) Исключение из обработки спутников с большим количеством маркированных наблюдений.

з) Исключение из обработки станций, содержащих большое количество плохих наблюдений.

и) Если какая-либо станция была исключена из обработки, то осуществлялся возврат к шагу 1г для формирования нового набора файлов первых разностей.

к) Получение суточных решений с действительными значениями фазовых неоднозначностей, оценка параметров тропосферы.

л) Фиксирование фазовых неоднозначностей с помощью методики QIF [5], при этом использовалась глобальная модель ионосферы, предоставляемая CODE, и тропосферные параметры, полученные на предыдущем шаге обработки 1к.

2. Получение оценок координат для отдельного дня наблюдений.

а) Обработка наблюдений с фиксированными фазовыми неоднозначностями с целью получить нормальные уравнения, оценка зенитной тро-

посферной задержки с использованием априорной модели.

б) Уравнивание полученных нормальных уравнений, оценка координат ГНСС-станций.

в) Проверка качества оценки координат референчных станций. Параметры преобразования Гельмерта (только сдвиг) между системой координат, которая задавалась полученными на предыдущем шаге координатами референчных станций, и системой координат, задаваемой координатами референчных станций из каталога IGS05, должны были быть равными нулю в пределах ошибок. Если остатки после преобразования для какой-либо компоненты координат какой-нибудь референчной станции превышали задаваемые максимальные значения, то эта станция исключалась из списка референчных станций для этого дня, и выполнялся возврат к шагу 2б для повторного уравнивания с использованием уменьшенного количества референчных станций.

г) Финальное уравнивание нормальных уравнений, оценка координат ГНСС-станций для суточных решений, получение финальных нормальных уравнений. Сохранение результатов в формате SINEX.

3. Получение оценок координат для отдельной недели.

а) После того как были получены решения для всех дней недели, проводилось уравнивание суточных файлов нормальных уравнений, полученных на шаге 2г.

б) Проверка качества оценки координат референчных станций, аналогичная, как для суточного решения. Если остатки после преобразования Гельмерта для какой-либо составляющей координат какой-нибудь референчной станции превышали задаваемые максимальные значения, то эта станция исключалась из списка референчных станций для этого решения, и выполнялся возврат к шагу 3а для повторного уравнивания с использованием уменьшенного количества референчных станций.

в) Финальное уравнивание нормальных уравнений, оценка координат ГНСС-станций для недельного решения. Сохранение результатов в формате SINEX.

4. Получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций. При этом фиксировались координаты всех станций, полученные на шаге 3в.

51 станция из выбранной сети являются членами EPN, поэтому возможно сравнить полученные решения с комбинированным решением EPN (обозначим его как EUR) для этой же недели. Были получены следующие параметры преобразования Гельмерта между решениями MAO(M) и EUR:

Сдвиг:

$$\begin{aligned} T_x &= 1.3 \pm 1.0 \text{ мм}, \\ T_y &= -2.4 \pm 1.2 \text{ мм}, \\ T_z &= 6.6 \pm 0.9 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Вращение:

$$\begin{aligned} R_x &= 0.10 \pm 0.03 \text{ мсд}, \\ R_y &= -0.09 \pm 0.03 \text{ мсд}, \\ R_z &= -0.07 \pm 0.03 \text{ мсд}. \end{aligned}$$

Масштабный множитель:

$$D = (-0.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-9}.$$

Средние значения остатков после преобразования Гельмерта для координат станций составили 0.4, 0.3 и 1.1 мм для северной, восточной и высотной составляющих соответственно.

Рассмотрим решения MAO(M) и MAO(G). В табл. 2 приведены основные характеристики этих решений. Из-за включения в обработку наблюдений ГЛОНАСС-спутников количество уравнений для решения MAO(M) увеличилось приблизительно на 28.1 % по сравнению с решением MAO(G). Это привело к увеличению времени обработки наблюдений приблизительно на 31.9 %. Количество неизвестных увеличилось приблизительно на 43.8 %. Это связано с тем, что текущая версия программного комплекса «Verpese GPS Software» не фиксирует фазовые неоднозначности для ГЛОНАСС-спутников. Поэтому фазовые неоднозначности для ГЛОНАСС-спутников, как и незафиксированные фазовые неоднозначности для GPS-спутников, рассматриваются как неизвестные. Таким образом, число степеней свободы для решения MAO(M) возросло приблизительно на 27.9 % по сравнению с решением MAO(G).

Средние значения разностей координат станций между решениями MAO(M) и MAO(G) равны:

- для северной составляющей — 0.5 мм (максимальное значение по модулю — 1.4 мм для станции MIZG),
- для восточной составляющей — 0.2 мм (максимальное значение по модулю — 0.7 мм для станции JVRS),
- для высотной составляющей — 1.1 мм (максимальное значение по модулю — 5.3 мм для станции FDRS).

Значения параметров преобразования Гельмерта между решениями MAO(M) и MAO(G) малы:

$$\begin{aligned} T_x &= -0.3 \pm 0.9 \text{ мм}, \\ T_y &= -1.9 \pm 0.9 \text{ мм}, \\ T_z &= 2.8 \pm 0.8 \text{ мм}, \\ R_x &= 0.08 \pm 0.03 \text{ мсд}, \\ R_y &= -0.07 \pm 0.03 \text{ мсд}, \\ R_z &= -0.03 \pm 0.03 \text{ мсд}, \\ D &= (-0.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-9}. \end{aligned}$$

Средние значения остатков после преобразования Гельмерта для координат станций составили:

- для северной составляющей — 0.4 мм (максимальное значение по модулю — 1.2 мм для станции MIZG),

Таблица 2. Характеристики решений MAO(G) и MAO(M)

Характеристика	MAO(G) (GPS)	MAO(M) (GPS+ГЛОНАСС)
Количество уравнений	1763620	2259828
Количество неизвестных	23779	34194
Количество степеней свободы	1739841	2225634
Время обработки	4:16:29	5:38:20

Таблица 3. Средние значения повторяемости координат

Составляющая	MAO(G) (GPS)	MAO(M) (GPS+ГЛОНАСС)
Северная	0.94 мм	0.93 мм
Восточная	0.57 мм	0.55 мм
Высотная	2.83 мм	2.76 мм

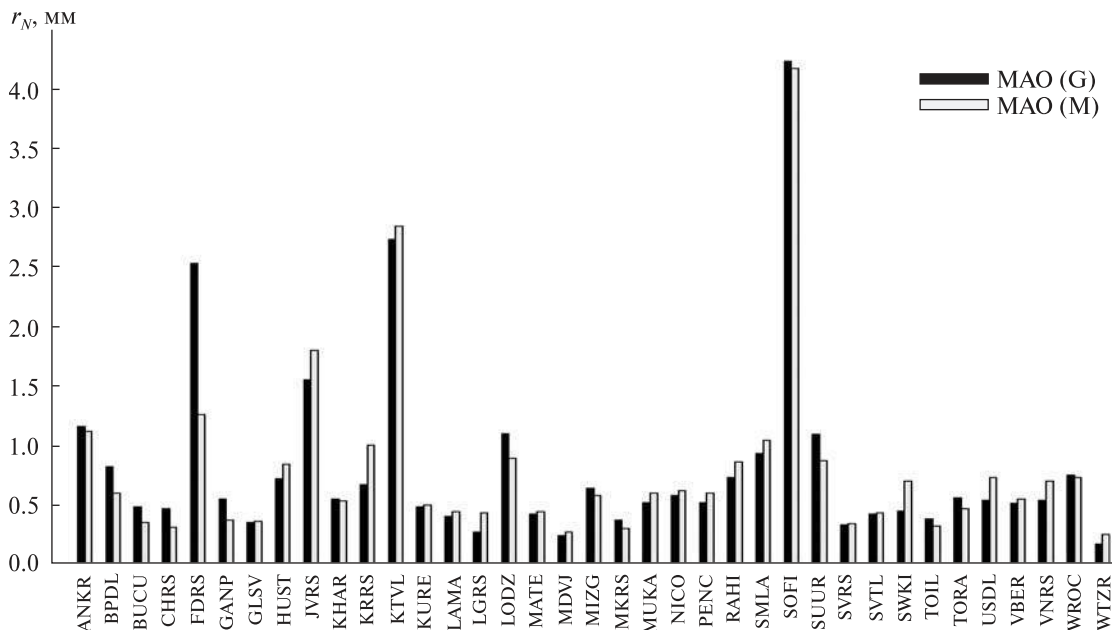


Рис. 2. Повторяемость северной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

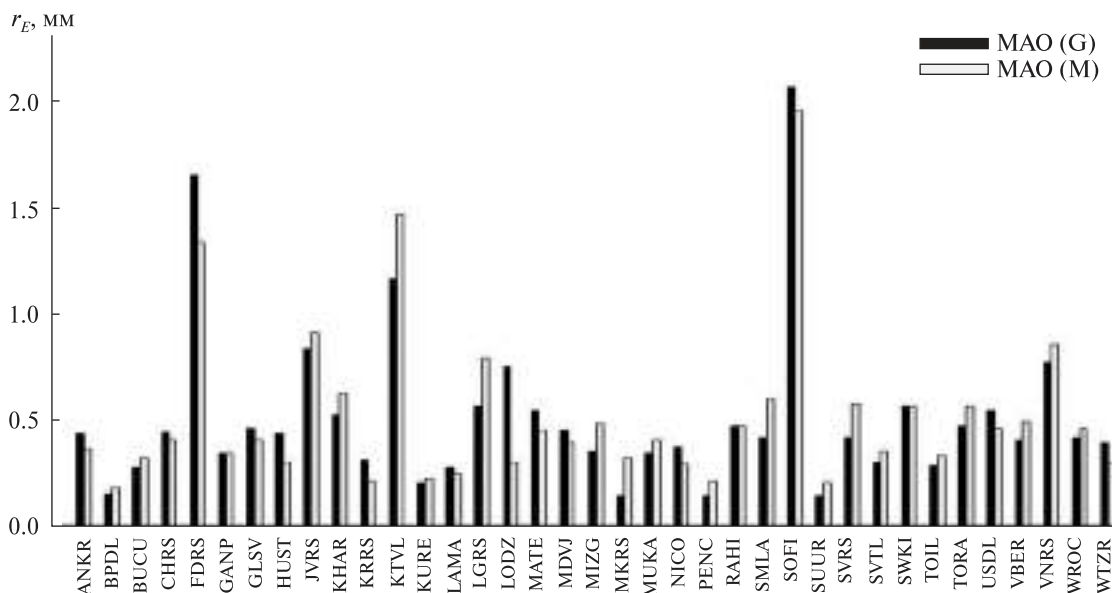


Рис. 3. Повторяемость восточной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

- для восточной составляющей — 0.2 мм (максимальное значение по модулю — 0.6 мм для станции JVRS),
- для высотной составляющей — 1.0 мм (максимальное значение по модулю — 4.8 мм для станции FDRS).

Видно, что значения разностей координат станций между решениями *MAO(M)* и *MAO(G)* и остатков после преобразования Гельмерта между этими решениями близки. То есть, разности координат не обусловлены различиями в реализации системы координат для разных решений.

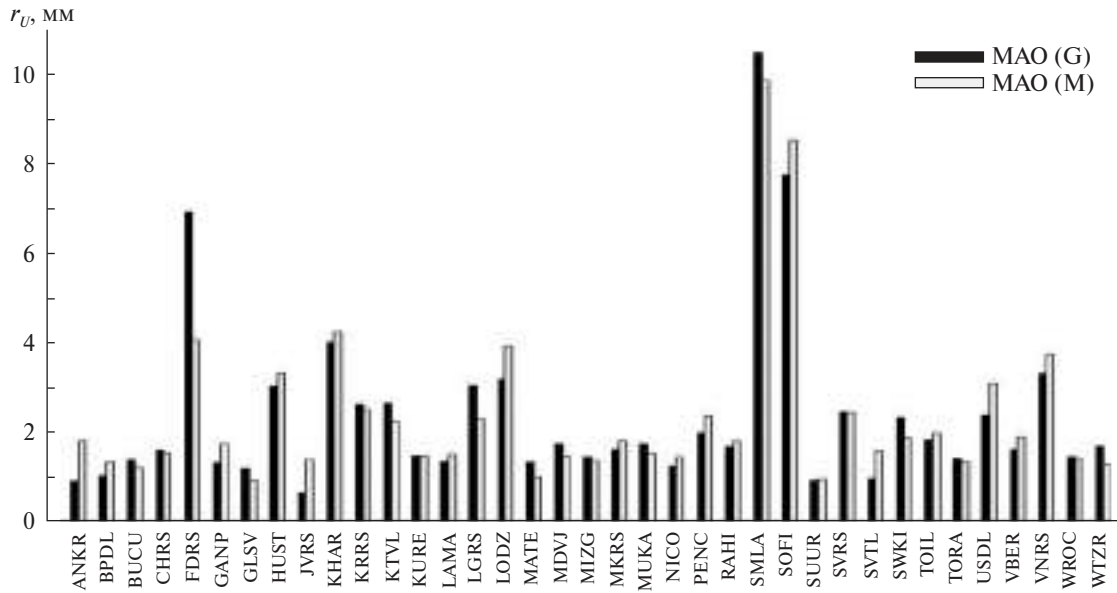


Рис. 4. Повторяемость высотной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

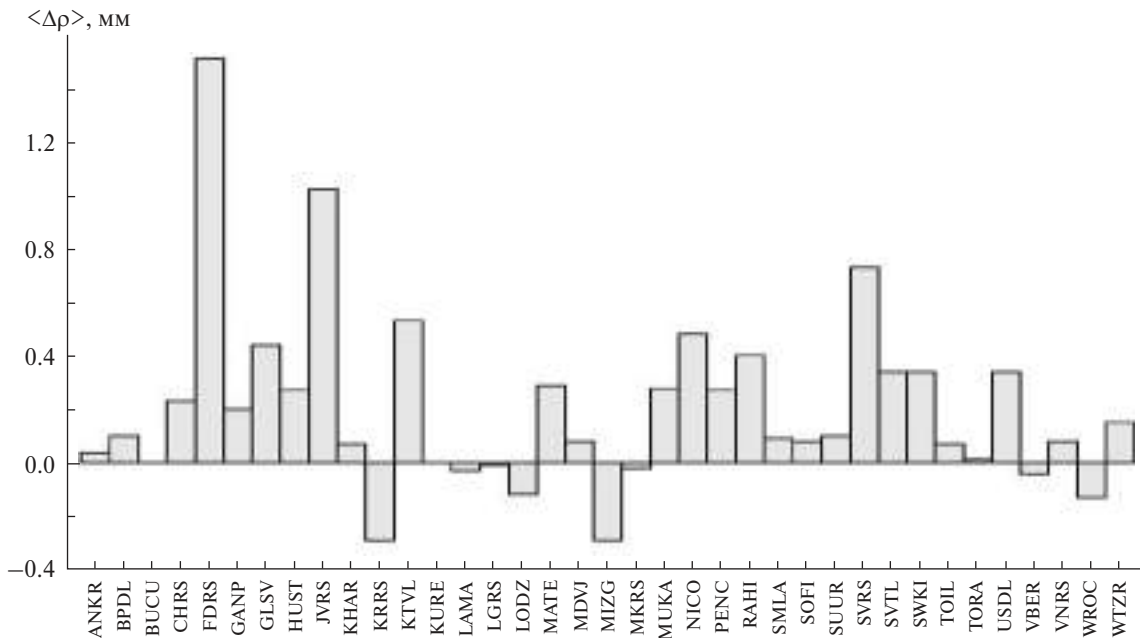


Рис. 5. Средние значения разностей зенитной тропосферной задержки для GPS/ГЛОНАСС-станций

Качество полученных решений можно оценить по повторяемости координат станций, т. е. по остаткам после преобразований Гельмерта между суточными и недельным решениями. В табл. 3 приведены средние значения повторяемости координат GPS/ГЛОНАСС-станций для

обоих решений. Следует заметить, что средние значения повторяемости координат для решения *MAO(M)* стали меньше, чем для решения *MAO(G)*, но незначительно. На рис. 2—4 показаны значения повторяемости координат GPS/ГЛОНАСС-станций по компонентам. Видно, что

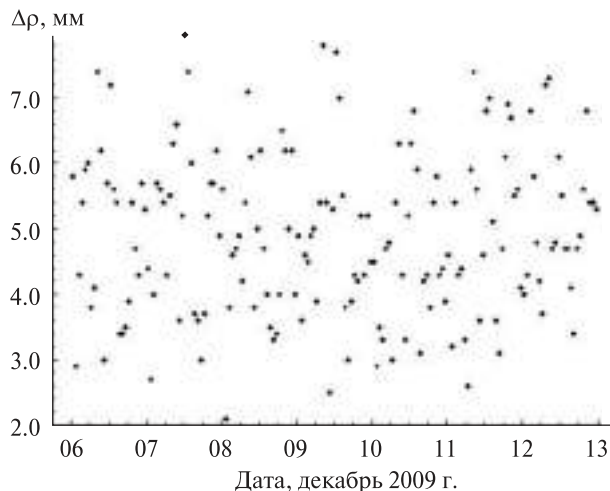


Рис. 6. Разности значений зенитной тропосферной задержки для станций EVPA и EVRS для решения $MAO(M)$

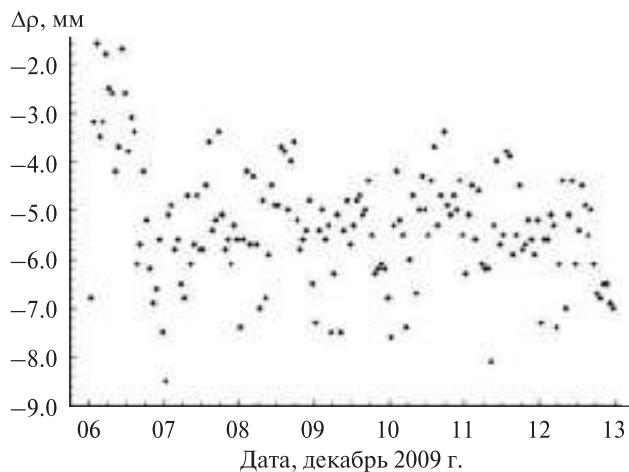


Рис. 7. Разности значений зенитной тропосферной задержки для станций KHAR и SURE для решения $MAO(M)$

Таблица 4. Длины баз между перманентными станциями, расположенными в одном городе

Город	Станции	$MAO(G)$ (GPS)	$MAO(M)$ (GPS+ГЛОНАСС)
Евпатория	EVPA—EVRS	538.8293 м	538.8294 м
Киев	GLSV—KIRS	9587.7953 м	9587.7958 м
Мукачево	MKRS—MUKA	7528.0420 м	7528.0423 м
Симеиз—Кацивели	CRAO—KTVL	2855.1046 м	2855.1038 м
Харьков	KHAR—KHRS	5619.4319 м	5619.4317 м
Харьков	KHAR—SURE	1294.8828 м	1294.8821 м
Харьков	SURE—KHRS	6249.9233 м	6249.9233 м
Чернигов	CNIV—CHRS	2328.0226 м	2328.0224 м

после включения ГЛОНАСС-спутников в обработку повторяемость полученных координат для некоторых станций улучшилась, для некоторых ухудшилась или почти не изменилась.

Средние разности оценок тропосферной рефракции между решениями $MAO(M)$ и $MAO(G)$ для GPS/ГЛОНАСС-станций лежат в диапазоне от -0.29 мм (для станций KRRS и MIZG) до 1.51 мм (для станции FDRS) и показаны на рис. 5.

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод: на данный момент включение ГЛОНАСС-спутников в обработку наблюдений перманентных станций, расположенных в средних широтах в Восточной Европе,

не улучшает точности полученных координат. Аналогичный вывод по отношению к перманентным станциям, расположенным в Западной Европе, был сделан, например, в работе [2].

Отметим несколько интересных дополнительных результатов этой обработки. В табл. 4 показаны длины баз между украинскими перманентными станциями, расположенными в одном городе. Различия между этими длинами баз из разных решений находятся на субмиллиметровом уровне.

На рис. 6—7 приведены разности значений зенитной тропосферной задержки для двух пар наиболее близко расположенных станций (EVPA и EVRS, KHAR и SURE соответственно) для ре-

шения *MAO(M)*. В обоих случаях разности находятся в основном в диапазоне 4—6 мм и почти не превосходят 8 мм.

1. *Bernese GPS Software Version 5.0* / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne. — 2007. — 612 p.
2. *Bruyninx C.* Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network // *GPS Solutions*. — 2007. — **11**, N. 2. — P. 97—106.
3. *Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C.* The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // *J. Geodesy*. — 2009. — **83**, N. 3—4. — P. 191—198.
4. *Guidelines for EPN analysis centres* [Электронный ресурс] / Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau // Режим доступа: http://www.epn-ncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf.
5. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System // *Inauguraldissertation der Philosophisch-natur-*

wissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. — 1995. — 155 p.

6. *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.

Надійшла до редакції 30.09.11

O. A. Khoda

DETERMINATION OF COORDINATES FOR PERMANENT STATIONS OF REGIONAL NETWORK: GPS VS GPS+GLONASS

Coordinate values for 71 permanent stations located in mean latitudes in the Eastern Europe were obtained using observations of only GPS satellites and of GPS and GLONASS satellites. From an analysis of repeatability for components of estimated coordinates of GPS/GLONASS stations it was concluded that, as for now, the inclusion of GLONASS satellites in processing of observation data for permanent stations located in this region did not improve the coordinate estimation accuracy.