

УДК 528.2:629.78

О. А. Хода

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ GPS- И ГЛОНАСС-СПУТНИКОВ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА СЕВЕРЕ ЕВРОПЫ

---

*Для сети перманентных станций, расположенных на севере Европы, было получено три решения: из обработки наблюдений только GPS-спутников, только ГЛОНАСС-спутников и совместной обработки наблюдений GPS- и ГЛОНАСС-спутников. На основе сравнения повторяемости составляющих полученных координат GPS/ГЛОНАСС-станций и определенных внешних средних квадратичных ошибок сделан вывод, что на данный момент ГЛОНАСС-решение по точности уступает GPS-решению, а включение ГЛОНАСС-спутников в обработку наблюдений перманентных станций, расположенных в этом регионе, не улучшает точность оценки координат.*

---

8 декабря 2011 г. был введён в эксплуатацию запущенный месяцем ранее спутник ГЛОНАСС—М № 44 (системный номер 744). С этого дня все точки космического сегмента системы (по восемь точек в трёх орбитальных плоскостях) стали заполненными [2], т. е. спутниковая группировка была развернута до штатного состава — 24 спутника. Это позволяет надёжно и непрерывно принимать навигационные сигналы ГЛОНАСС в любой точке Земли без каких-либо ограничений, а также даёт возможность как получить корректное решение из обработки наблюдений только ГЛОНАСС-спутников, так и сравнить его с GPS-решением и с комбинированным GPS/ГЛОНАСС-решением.

Предыдущие сравнения GPS- и GPS/ГЛОНАСС-решений были проведены до полного развёртывания системы ГЛОНАСС и показали, что включение ГЛОНАСС-спутников в обработку наблюдений перманентных станций, расположенных в средних широтах Европы, не улучшает точности оценки координат станций [3, 5, 8].

По-прежнему точность комбинированных точных эфемерид Международной ГНСС-службы (IGS) для GPS-спутников приблизительно

в два раза лучше, чем для ГЛОНАСС-спутников (2.5 см против 5.0 см). Погрешность оценки поправок часов GPS-спутников составляет 75 пс [7], поправки для часов ГЛОНАСС-спутников на данный момент не оцениваются IGS, в файлы точных эфемерид записываются значения из переданных эфемерид.

Для сравнения GPS-, ГЛОНАСС- и GPS/ГЛОНАСС-решений была выбрана сеть из 37 перманентных GPS/ГЛОНАСС-станций, входящих в Европейскую перманентную ГНСС-сеть (EPN) и расположенных на севере Европы: ARG1 (Аргир, Торсхавн, Фарерские острова, Дания), BELF (Белфаст, Великобритания), BOGI (Борова Гура, Польша), BORJ (Боркум, Германия), BUDP (Копенгаген, Дания), BYDG (Быдгощ, Польша), DARE (Дарсбери, Великобритания), ENIS (Эннискиллен, Великобритания), FOYL (Лондондерри, Великобритания), GWWL (Гожув-Велькопольски, Польша), HELG (о. Гельголанд, Германия), NOBU (Хоэнбюнсторф, Эшенберг, Германия), NOE2 (Хёрнум/о. Зюльт, Германия), NOFN (Хёбн, Исландия), INVR (Инвернесс, Великобритания), JOZ2 (Юзефослав, Польша), KIR0 (Кируна, Швеция), KURE (Курессааре, Эстония), LAMA (Лямкувко, Олыштын, Польша), MAR6 (Мертсбо, Евле, Швеция), MDVJ

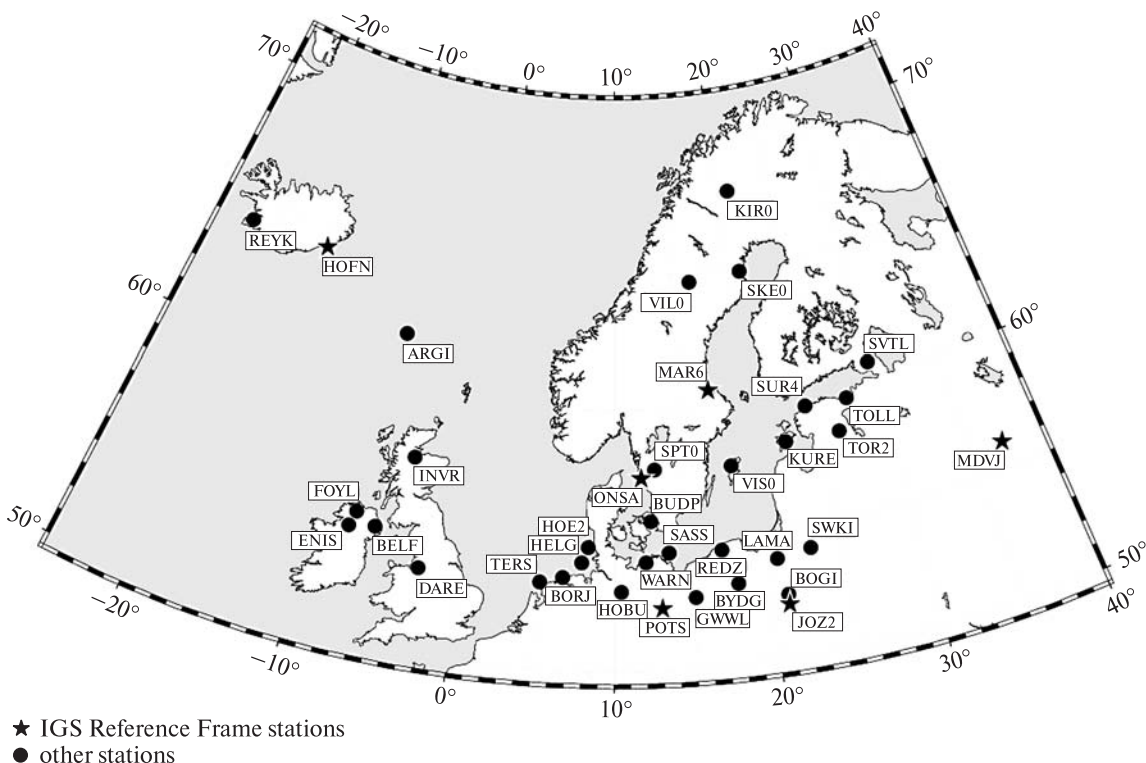


Рис. 1. Расположение GPS/ГЛОНАСС-станций

(Менделеево, Россия), ONSA (Онсала, Швеция), POTS (Потсдам, Германия), REDZ (Редзиково, Польша), REYK (Рейкьявик, Исландия), SASS (Засниц/о. Рюген, Германия), SKE0 (Шеллефтео, Швеция), SPT0 (Бурос, Швеция), SUR4 (Суурупи, Таллин, Эстония), SVTL (Светлое, Россия), SWKI (Сувалки, Польша), TERS (Вест-Терсхеллинг, Нидерланды), TOIL (Тойла, Эстония), TOR2 (Тыравере, Эстония), VILO (Вильгельмина, Швеция), VIS0 (Висбю, Швеция), WARN (Росток-Варнемюнде, Германия). Схема расположения ГНСС-станций показана на рис. 1.

Обработка была выполнена в ГАО НАН Украины с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [4] в соответствии с требованиями EPN [6]. Процедуру обработки наблюдений можно разделить на четыре этапа:

- 1) предварительная обработка суточных сессий наблюдений;
- 2) оценка координат для отдельного дня наблюдений;
- 3) оценка координат для недели;

4) получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Схема получения решения показана на рис. 2 и 3, подробнее процедура обработки описана в работе [3].

В качестве исходных данных использовались наблюдения GPS/ГЛОНАСС-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 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) [9] и так называемые DCB-файлы, предоставляемые Центром определения орбит в Европе (Center for Orbit Determination in Europe, CODE), содержащие оценки разностей кодовых наблюдений для каждого GPS/ГЛОНАСС-спутника.

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

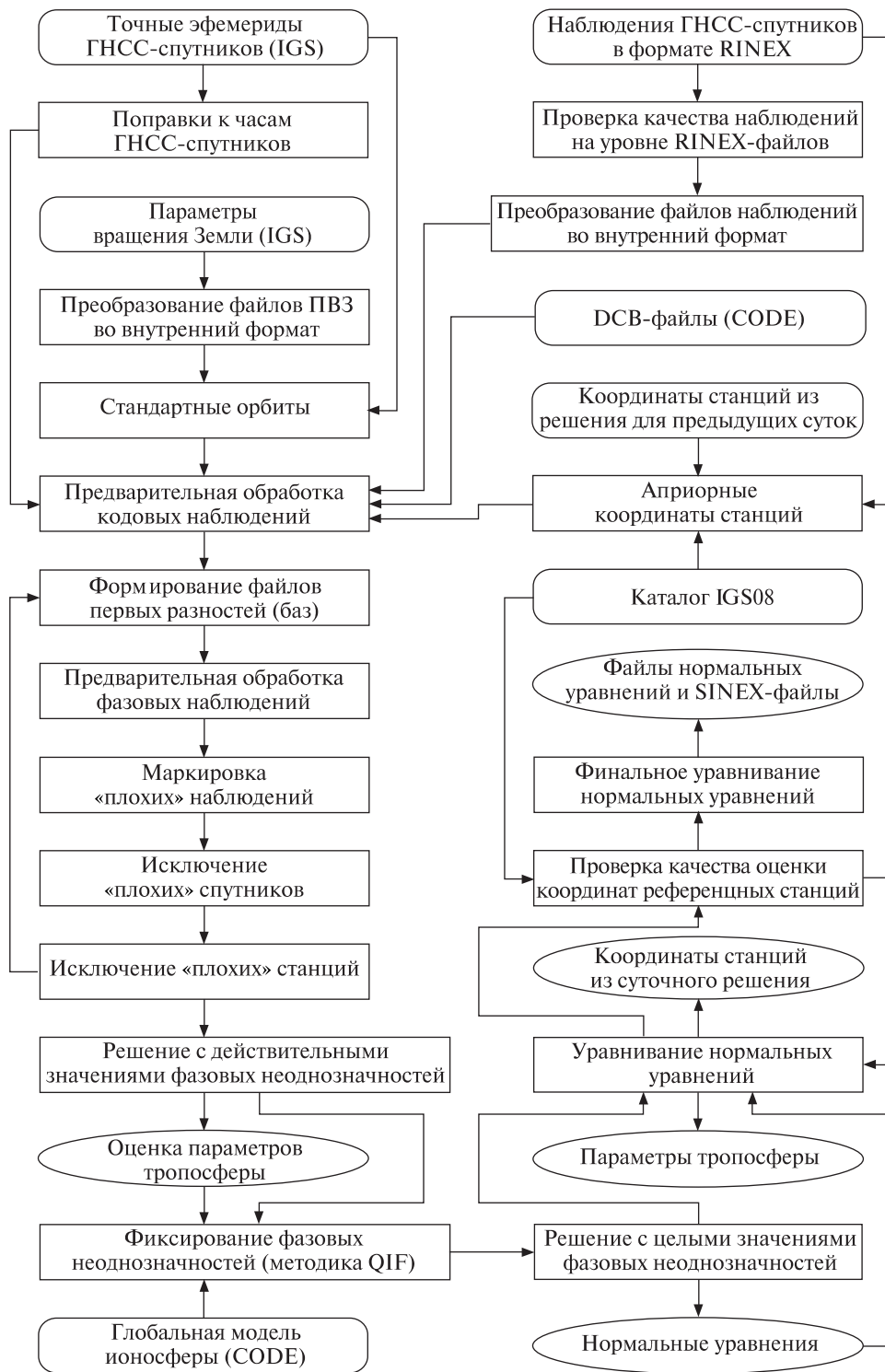


Рис. 2. Диаграмма получения суточного решения

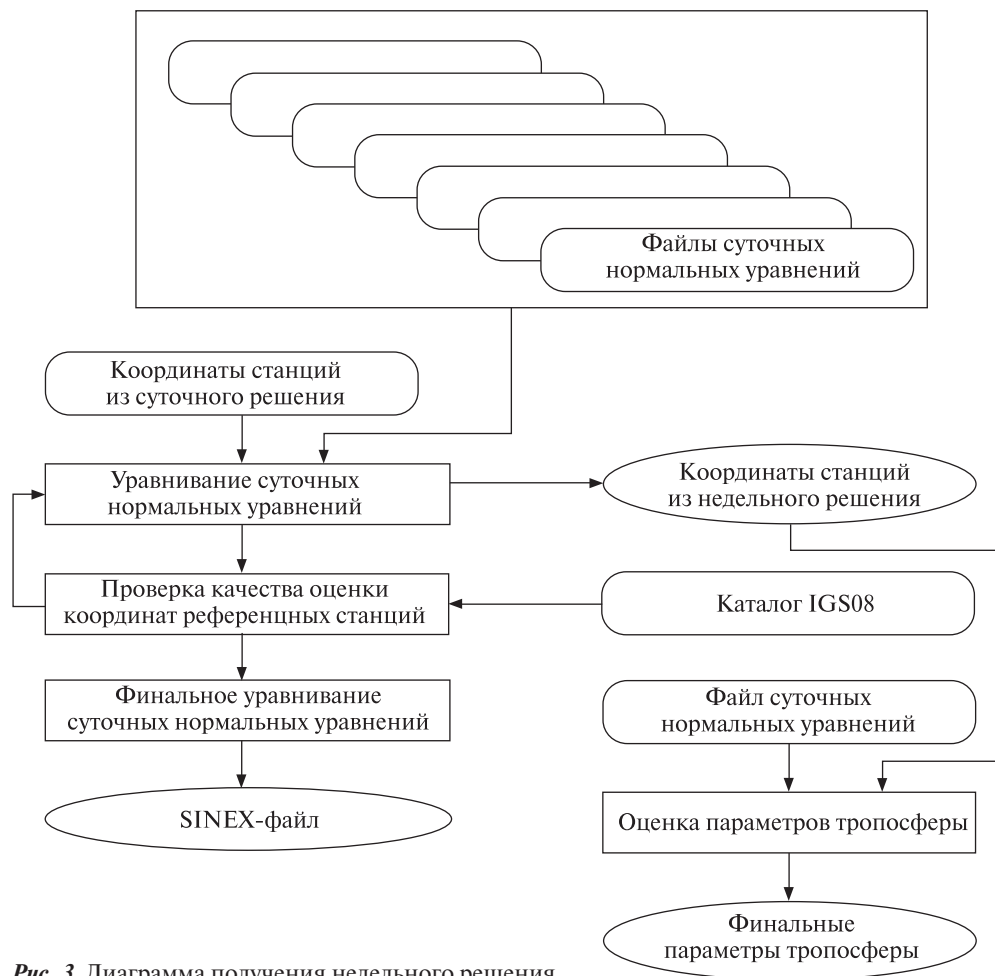


Рис. 3. Диаграмма получения недельного решения

ты референчных станций HOFN, JOZ2, MAR6, MDVJ, ONSA и POTS.

Для обработки была выбрана GPS-неделя 1673 (29 января — 4 февраля 2012 г., дни года 029—035).

Было получено три варианта решений. В первом варианте обрабатывались наблюдения только GPS-спутников, полученное решение обозначено как  $MAO(G)$ . Во втором варианте обрабатывались наблюдения только ГЛОНАСС-спутников, полученное решение обозначено как  $MAO(R)$ . И в третьем варианте проводилась обработка как GPS-, так и ГЛОНАСС-спутников, данное комбинированное решение обозначено как  $MAO(M)$ . Остальные исходные данные и алгоритм обработки были идентичны для всех вариантов ре-

шений. Стоит заметить, что текущая версия программного комплекса «Bernese GPS Software» не фиксирует фазовые неоднозначности для ГЛОНАСС-спутников, поэтому при обработке наблюдений только ГЛОНАСС-спутников шаг фиксирования фазовых неоднозначностей пропускаться.

В табл. 1 приведены характеристики трёх полученных решений. Видно, что для обработки только ГЛОНАСС-спутников потребовалось гораздо меньше времени, чем для обработки только GPS-спутников. Это обусловлено как меньшим на 20 % количеством уравнений из-за меньшего количества наблюдаемых ГЛОНАСС-спутников, так и пропуском шага фиксирования фазовых неоднозначностей для решения  $MAO(R)$ . В

Таблица 1. Характеристики полученных решений

Параметр	MAO(G) (GPS)	MAO(R) (ГЛОНАСС)	MAO(M) (GPS + ГЛОНАСС)
Количество уравнений	1047684 (100 %)	838355 (80.0 %)	1992468 (190.2 %)
Количество неизвестных	14220 (100 %)	23973 (168.6 %)	30355 (213.5 %)
Количество степеней свободы	1033464 (100 %)	814382 (78.8 %)	1962113 (189.9 %)
Время обработки	2:24:38 (100 %)	1:31:38 (63.4 %)	4:51:48 (201.8 %)

то же время количество неизвестных для решения MAO(R) на 68.6 % больше, чем для решения MAO(G), так как все фазовые неоднозначности для ГЛОНАСС-спутников рассматриваются как неизвестные. Это приводит к тому, что для решения MAO(R) количество степеней свободы на 21.2 % меньше, чем для решения MAO(G). Для комбинированного решения MAO(M) все характеристики приблизительно в два раза больше, чем для решения MAO(G).

В табл. 2 представлены координаты станций из решения MAO(G) в системе координат IGS08 на

Таблица 2. Координаты станций из решения MAO(G) и разности координат между решениями MAO(R) и MAO(G), MAO(M) и MAO(G). Система координат — IGS08, эпоха — 1 февраля 2012 г. 12:00 (время GPS)

Станция	Номер DOMES	$X_G, \text{ м}$	$Y_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$
		$X_R - X_G, \text{ м}$	$Y_R - Y_G, \text{ м}$	$Z_R - Z_G, \text{ м}$
		$X_M - X_G, \text{ м}$	$Y_M - Y_G, \text{ м}$	$Z_M - Z_G, \text{ м}$
ARGI	10117M002	2981489.7402	-354651.5436	5608475.0382
		-0.0002	0.0002	0.0023
		-0.0007	-0.0001	0.0007
BELF	13240M001	3685257.9243	-382908.9546	5174311.0857
		0.0013	-0.0009	0.0005
		0.0002	-0.0005	-0.0003
BOGI	12207M003	3633815.2123	1397454.2290	5035281.0479
		-0.0012	-0.0033	-0.0027
		-0.0004	-0.0007	-0.0005
BORJ	14268M002	3769402.8926	440564.3512	5109099.1533
		0.0055	-0.0009	0.0075
		0.0017	-0.0004	0.0027
BUDP	10101M003	3513638.1427	778956.5069	5248216.4997
		-0.0007	-0.0016	0.0013
		-0.0004	-0.0005	0.0007
BYDG	12224M001	3647216.7446	1184604.4019	5079625.2222
		0.0023	-0.0004	-0.0001
		0.0012	-0.0001	0.0000
DARE	13208S001	3811965.2791	-175799.7179	5093615.7919
		0.0015	0.0006	0.0042
		0.0001	-0.0002	0.0016
ENIS	13246M001	3688503.8081	-495090.4651	5162577.5461
		-0.0003	-0.0002	-0.0009
		-0.0003	0.0000	-0.0008
FOYL	13241M001	3638083.1920	-468414.5377	5200402.6078
		0.0005	-0.0003	0.0019
		-0.0002	0.0001	0.0003
GWWL	12225M001	3734525.7318	1015013.1181	5053042.7936
		0.0034	0.0033	-0.0002
		0.0021	0.0002	-0.0002

Продолжение табл. 2

Станция	Номер DOMES	$X_G, \text{ м}$ $X_R - X_G, \text{ м}$ $X_M - X_G, \text{ м}$	$Y_G, \text{ м}$ $Y_R - Y_G, \text{ м}$ $Y_M - Y_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$ $Z_R - Z_G, \text{ м}$ $Z_M - Z_G, \text{ м}$
HELG	14264M001	3706067.0842 0.0049 0.0020	513803.9879 -0.0004 0.0000	5148174.5462 0.0037 0.0014
NOBU	14202M003	3778219.6763 -0.0040 -0.0016	698635.5489 -0.0010 -0.0003	5074054.2879 -0.0045 -0.0017
HOE2	14284M002	3650022.5774 0.0063 0.0020	532050.6692 -0.0007 0.0001	5185984.5665 0.0098 0.0037
HOFN	10204M002	2679689.9623 -0.0007 -0.0004	-727951.1146 0.0006 0.0004	5722789.4524 -0.0006 -0.0003
INVR	13221M001	3427172.0771 0.0012 0.0000	-252834.0219 -0.0019 -0.0001	5355255.7951 0.0032 0.0006
JOZ2	12204M002	3664880.4431 -0.0013 -0.0005	1409190.6986 0.0006 -0.0005	5009618.5372 -0.0003 -0.0004
KIR0	10422M001	2248123.0707 -0.0009 -0.0007	865686.7558 -0.0006 0.0000	5886425.8330 0.0011 0.0005
KURE	10604S001	3107617.2985 0.0025 0.0008	1287856.6193 -0.0005 0.0000	5400807.3471 0.0053 0.0023
LAMA	12209M001	3524522.7907 0.0012 0.0002	1329693.7305 0.0001 0.0001	5129846.4073 0.0039 0.0015
MAR6	10405M002	2998189.3169 0.0031 0.0010	931451.8801 -0.0012 0.0000	5533398.7711 0.0041 0.0017
MDVJ	12309M005	2845455.9302 0.0006 0.0005	2160954.3292 0.0012 0.0005	5265993.2710 0.0046 0.0024
ONSA	10402M004	3370658.4412 -0.0007 -0.0005	711877.2452 -0.0017 -0.0003	5349787.0273 0.0001 0.0001
POTS	14106M003	3800689.5153 -0.0011 -0.0002	882077.4980 0.0006 -0.0002	5028791.3837 -0.0078 -0.0033
REDZ	12227M001	3550066.4779 0.0018 0.0008	1093332.0999 0.0016 0.0002	5167562.1957 0.0030 0.0012
REYK	10202M001	2587384.1663 0.0002 -0.0002	-1043033.5392 -0.0009 0.0002	5716564.1082 0.0038 0.0014
SASS	14281M001	3606145.9635 -0.0044 -0.0018	875303.4564 -0.0005 -0.0007	5170194.0100 -0.0051 -0.0023

Станция	Номер DOMES	$X_{G, M}$ $X_R - X_{G, M}$ $X_M - X_{G, M}$	$Y_{G, M}$ $Y_R - Y_{G, M}$ $Y_M - Y_{G, M}$	$Z_{G, M}$ $Z_R - Z_{G, M}$ $Z_M - Z_{G, M}$
SKE0	10426M001	2534030.7897 -0.0006 -0.0002	975174.6627 -0.0015 0.0000	5752078.6502 0.0021 0.0015
SPT0	10425M001	3328984.4281 -0.0014 -0.0007	761910.3713 -0.0013 -0.0004	5369033.7702 -0.0013 -0.0005
SUR4	10601M002	2959056.7856 0.0015 0.0002	1341058.7812 0.0004 0.0004	5470427.0378 0.0046 0.0019
SVTL	12350M001	2730155.2189 0.0023 0.0003	1562364.8282 -0.0028 -0.0002	5529989.3155 0.0067 0.0032
SWKI	12228M001	3452304.3775 -0.0070 -0.0022	1460314.8898 -0.0015 -0.0014	5143362.6368 -0.0077 -0.0030
TERS	13534M001	3798580.5148 -0.0013 -0.0005	346994.1775 -0.0008 -0.0005	5094781.0940 0.0008 0.0008
TOIL	10605S001	2884257.0996 0.0020 0.0003	1503794.1601 -0.0012 0.0000	5468067.9933 0.0061 0.0026
TOR2	10602M001	3010733.6118 0.0020 0.0003	1498577.0993 -0.0007 0.0001	5401387.5552 0.0039 0.0015
VIL0	10424M001	2620258.4834 0.0054 0.0020	779138.2354 -0.0006 0.0003	5743799.5644 0.0076 0.0033
VIS0	10423M001	3246470.1389 -0.0012 -0.0006	1077900.6161 -0.0014 -0.0006	5365278.1644 0.0012 0.0005
WARN	14277M002	3658785.6866 0.0035 0.0009	784470.9906 0.0001 0.0004	5147870.6562 0.0062 0.0023

среднюю эпоху обработанного периода наблюдений, а также разности координат между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$ ,  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$ .

Абсолютные значения разностей координат между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$  по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  лежат в диапазонах от 0.2 мм (для станций ARG1 и REYK) до 7.0 мм (для станции SWKI), от 0.1 мм (для станции WARN) до 3.3 мм (для станций BOGI, GWWL) и от 0.1 мм (для станции BYDG) до 9.8 мм (для станции HOE2) соответственно. Средние значения разностей координат между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$  составляют:

для северной составляющей — 1.5 мм (максимальное значение по модулю — 4.0 мм для станции POTS),

для восточной составляющей — 1.4 мм (максимальное значение по модулю — 3.6 мм для станции SVTL),

для высотной составляющей — 5.0 мм (максимальное значение по модулю — 11.5 мм для станции HOE2).

Абсолютные значения разностей координат между решениями  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  лежат в диапазонах от 0.0 мм (для стан-



ции INVR) до 2.2 мм (для станции SWKI), от 0.0 мм (для семи станций) до 1.4 мм (для станции SWKI) и от 0.0 мм (для станции BYDG) до 3.3 мм (для станции VIL0) соответственно. Средние значения разностей координат между решениями  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  равны:

для северной составляющей — 0.8 мм (максимальное значение по модулю — 1.8 мм для станций POTS и GWWL),

для восточной составляющей — 0.3 мм (максимальное значение по модулю — 0.6 мм для станции BORJ),

для высотной составляющей — 2.0 мм (максимальное значение по модулю — 4.2 мм для станции HOE2).

Значения параметров преобразования Гельмерта между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$ ,  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  представлены в табл. 3.

Средние значения остатков после преобразования Гельмерта между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$  для координат станций составляют:

для северной составляющей — 1.4 мм (максимальное значение по модулю — 4.3 мм для станции POTS),

для восточной составляющей — 1.2 мм (максимальное значение по модулю — 2.8 мм для станции SVTL),

для высотной составляющей — 4.5 мм (максимальное значение по модулю — 11.7 мм для станции SWKI).

Средние значения остатков после преобразования Гельмерта между решениями  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  для координат станций равны:

для северной составляющей — 0.7 мм (максимальное значение по модулю — 2.0 мм для станций POTS и GWWL),

для восточной составляющей — 0.3 мм (максимальное значение по модулю — 0.5 мм для станции BOGI и -0.5 мм для станций FOYL и HOFN),

для высотной составляющей — 1.7 мм (максимальное значение по модулю — 4.6 мм для станции SWKI).

Оценить качество трёх полученных решений можно по значениям повторяемости составляющих координат GPS/ГЛОНАСС-станций, т. е. по остаткам после преобразований Гельмерта

Таблица 3. Параметры преобразования Гельмерта между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$ ,  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$

Параметр	$MAO(R)$ vs $MAO(G)$	$MAO(M)$ vs $MAO(G)$
Сдвиг по оси $X$ , мм	12.7±5.4	6.2±2.1
Сдвиг по оси $Y$ , мм	0.9±4.1	-1.4±1.6
Сдвиг по оси $Z$ , мм	-8.0±4.3	-3.3±1.7
Вращение вокруг оси $X$ , мсд	0.00±0.13	0.03±0.05
Вращение вокруг оси $Y$ , мсд	0.48±0.20	0.22±0.08
Вращение вокруг оси $Z$ , мсд	0.02±0.12	-0.05±0.04
Масштабный множитель, $10^{-9}$	-3±5	-2±2

Таблица 4. Средние значения повторяемости координат

Составляющая, мм	$MAO(G)$ (GPS)	$MAO(R)$ (ГЛОНАСС)	$MAO(M)$ (GPS+ ГЛОНАСС)
Северная	0.54 (100 %)	0.57 (105.6 %)	0.51 (94.4 %)
Восточная	0.41 (100 %)	0.99 (241.5 %)	0.46 (112.2 %)
Высотная	1.84 (100 %)	2.08 (113.0 %)	1.65 (89.7 %)

между суточными и недельным решениями для каждого варианта решений. Средние значения повторяемости координат станций для каждого решения приведены в табл. 4. Видно, что значения повторяемости координат для решения  $MAO(R)$  (результата обработки наблюдений только ГЛОНАСС-спутников) больше значений повторяемости координат для решения  $MAO(G)$  (результата обработки наблюдений только GPS-спутников). И если для северной и высотной составляющих это различие не так уж велико (больше на 5.6 % и 13.0 % соответственно), то различие для восточной составляющей существенно — значения повторяемости для решения  $MAO(R)$  более чем в 2.4 раза больше, чем для решения  $MAO(G)$ . Это можно объяснить тем, что наклон орбит ГЛОНАСС-спутников больше, чем угол наклона орбит GPS-спутников. Соответственно движение ГЛОНАСС-спутников по сравнению с движением GPS-спутников более ориентировано по направлению север — юг, чем по направлению запад — восток.

Средние значения повторяемости северной и высотной составляющих координат станций для решения  $MAO(M)$  стали меньше, чем для реше-



ния  $MAO(G)$ , но незначительно (на 5.6 % и 10.3 % соответственно). Повторяемость восточной составляющей координат для решения  $MAO(M)$  ухудшилось на 12.2 % по сравнению с решением  $MAO(M)$ .

Значения повторяемости северной, восточной и высотной составляющих координат GPS/ГЛОНАСС-станций показаны на рис. 4–6 соответственно.

На рис. 7–8 представлены разности значений повторяемости составляющих координат GPS/ГЛОНАСС-станций между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$ ,  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  соответственно в зависимости от широт станций. Видно, что даже для самых северных станций значения повторяемости координат для решения  $MAO(R)$  хуже, чем для решения  $MAO(G)$ . Повторяемость координат для решения  $MAO(M)$  по сравнению с решением  $MAO(G)$  для одних станций улучшилась, для других ухудшилась, для третьих почти не изменилась.

Средние значения разностей зенитной тропосферной рефракции для GPS/ГЛОНАСС-станций (рис. 9) между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$

не превышают 2 мм, между решениями  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$  — 1 мм.

Наличие трёх решений позволяет оценить их внешние средние квадратичные ошибки и коэффициенты корреляции по методике, применяющейся в Главной астрономической обсерватории НАН Украины [1].

Пусть имеется  $K$  решений с  $N$  общими станциями. Обозначим через  $x$  одну из координат станций ( $X$ ,  $Y$  или  $Z$ ). Для  $i$ -й станции найдём среднее значение координаты  $x_{0i}$ :

$$x_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^K p_i^j x_i^j}{\sum_{j=1}^K p_i^j},$$

где  $p_i^j = (\sigma_i^j)^{-2}$  — вес координаты  $x_i^j$   $i$ -й станции из  $j$ -го решения. Для каждой общей станции создадим разности координат

$$\Delta x_{0i}^j = x_i^j - x_{0i}$$

и будем рассматривать полученные последовательности  $\{\Delta x_{0i}^j\}_{i=1, \dots, N}$  как случайные величины.

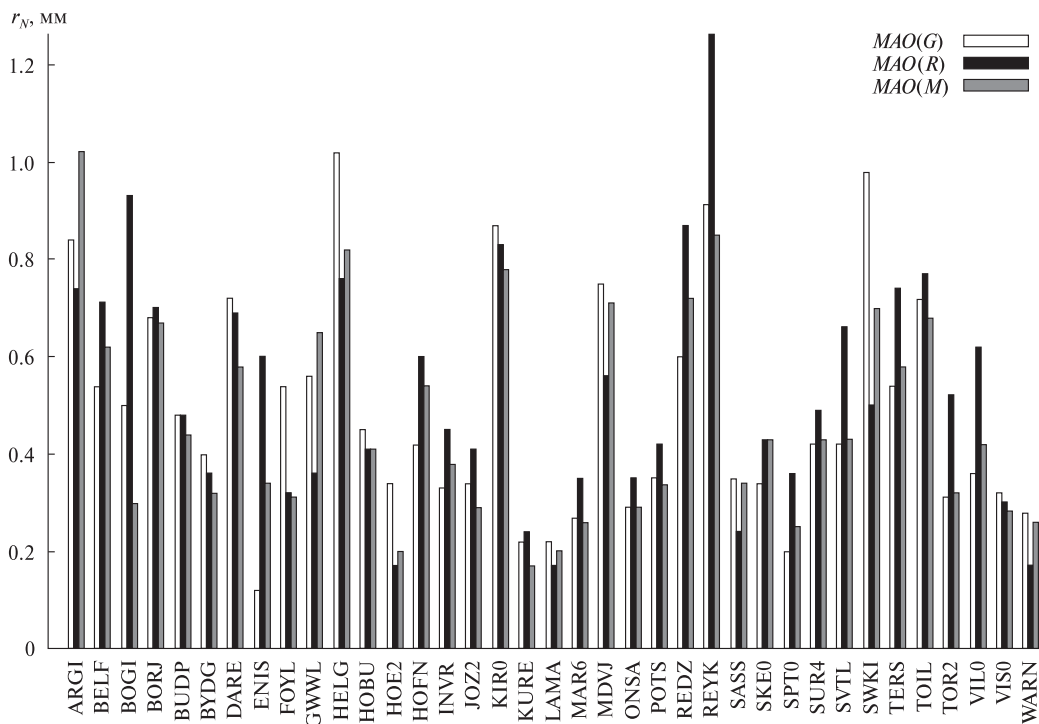


Рис. 4. Повторяемость северной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

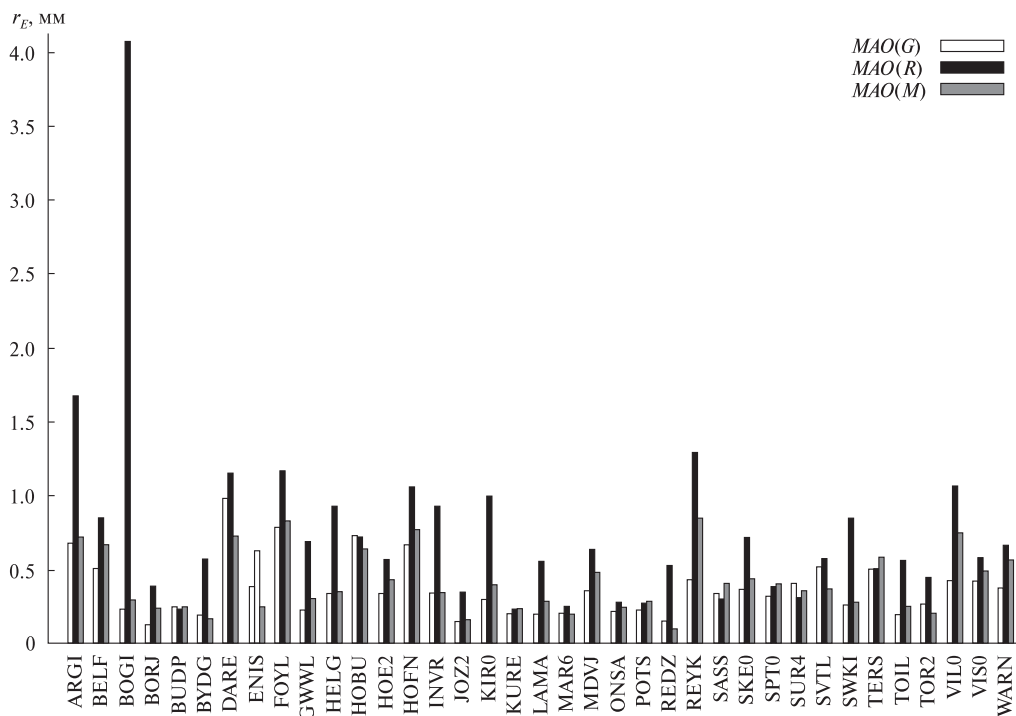


Рис. 5. Повторяемость восточной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

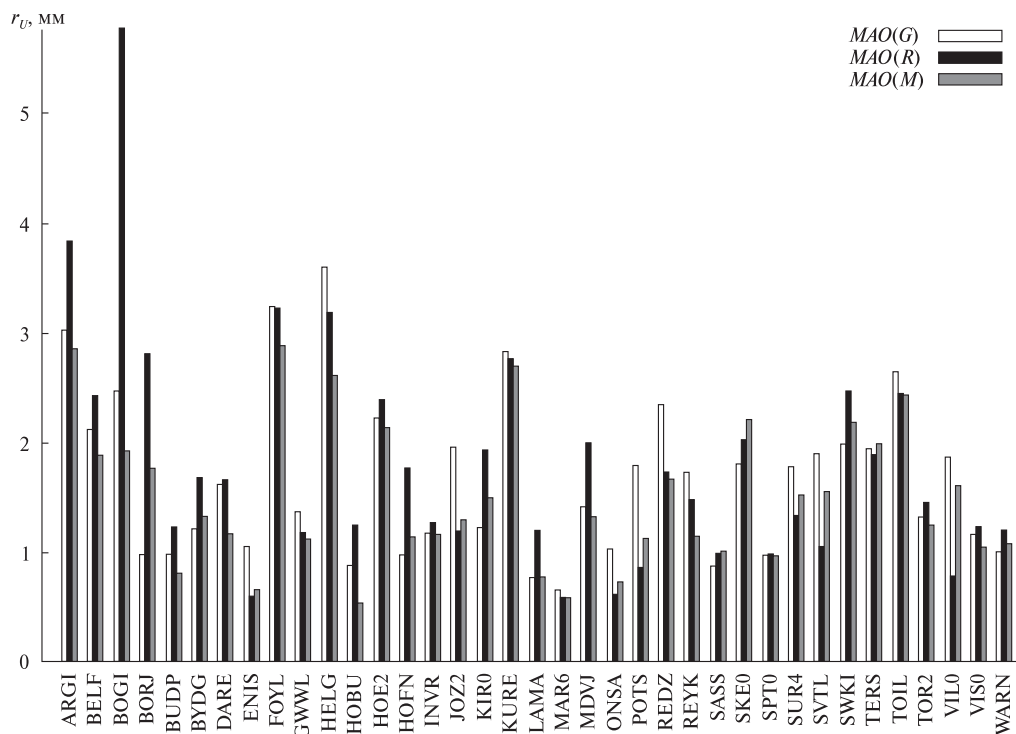


Рис. 6. Повторяемость высотной составляющей координат GPS/ГЛОНАСС-станций

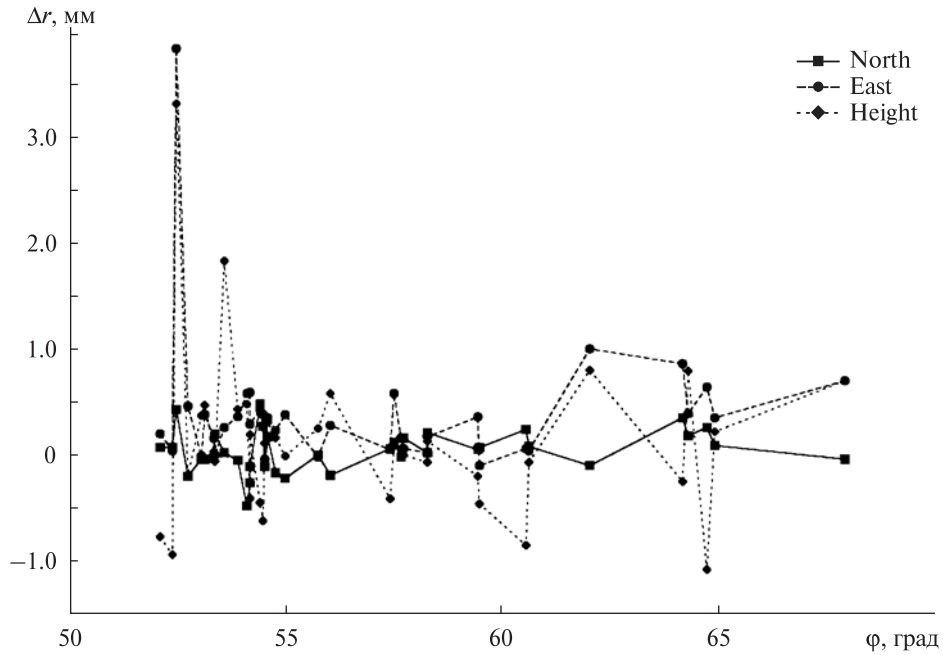


Рис. 7. Разности значений повторяемости составляющих координат GPS/ГЛОНАСС-станций между решениями  $MAO(R)$  и  $MAO(G)$

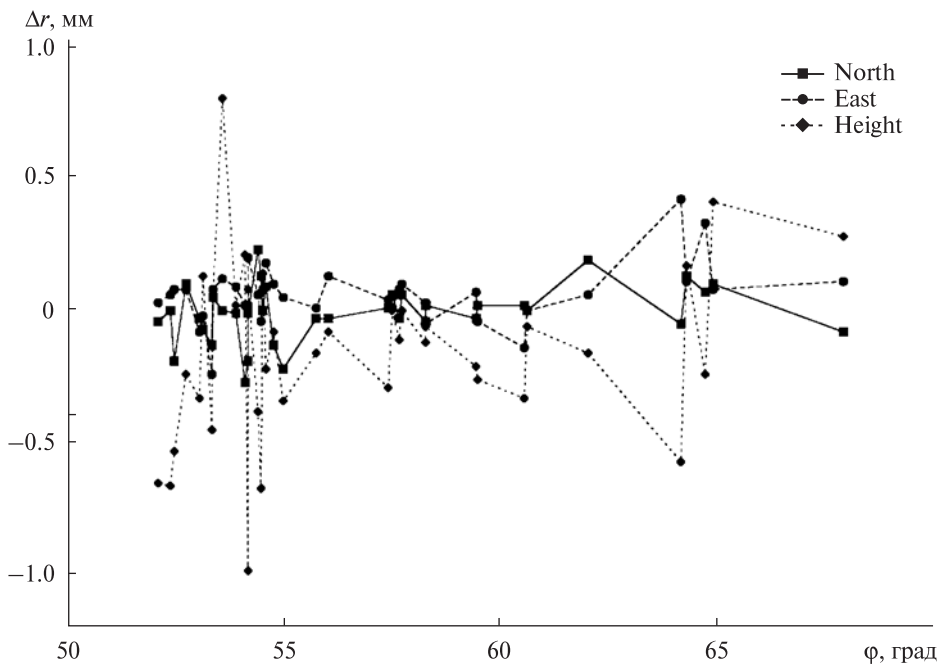


Рис. 8. Разности значений повторяемости составляющих координат GPS/ГЛОНАСС-станций между решениями  $MAO(M)$  и  $MAO(G)$

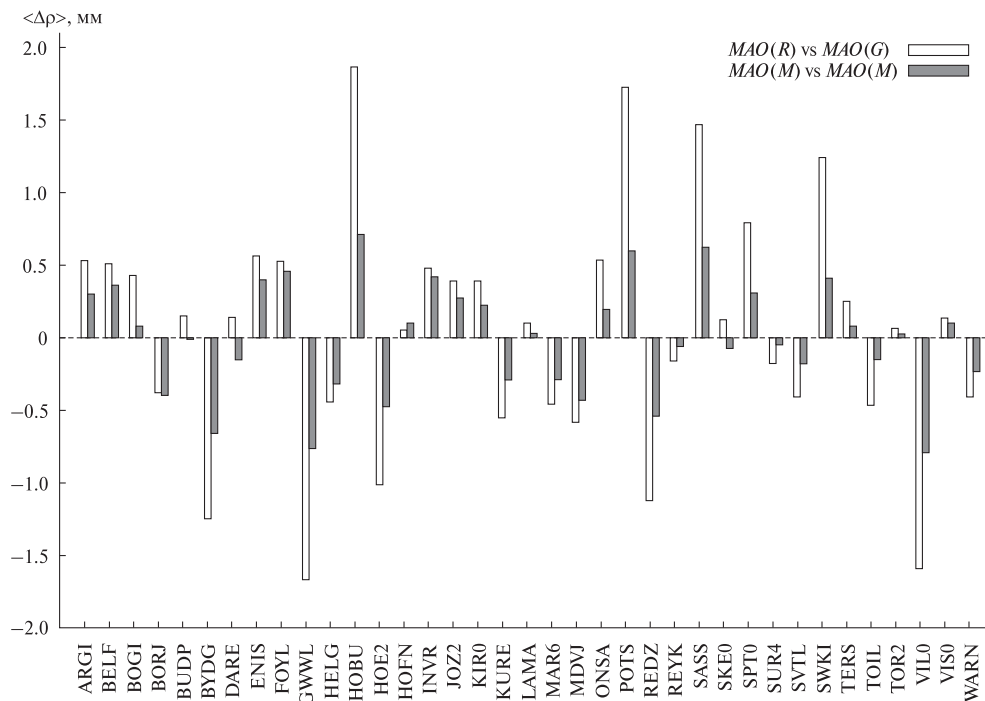


Рис. 9. Средние значения разностей зенитной тропосферной рефракции для GPS/ГЛОНАСС-станций

Перейдём от них к централизованным величинам и определим математические ожидания квадратов разностей и сумм разниц координат станций из  $k$ -го и  $l$ -го решений:

$$D_{kl} = M[(\hat{\Delta x}_0^k - \hat{\Delta x}_0^l)^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 - 2\rho_{kl}\sigma_k\sigma_l,$$

$$S_{kl} = M[(\hat{\Delta x}_0^k + \hat{\Delta x}_0^l)^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 + 2\rho_{kl}\sigma_k\sigma_l,$$

где  $M[\cdot]$  — оператор математического ожидания,  $\sigma_k$  и  $\sigma_l$  — внешние средние квадратичные ошибки определения координат станций из  $k$ -го и  $l$ -го решений соответственно,  $\rho_{kl}$  — коэффициент корреляции между соответствующими координатами станций из  $k$ -го и  $l$ -го решений,  $\hat{\Delta x}_0^j$  — централизованные значения  $\Delta x_0^j$ .

В случае трёх решений, создавая суммы величин  $S_{kl}$  и  $D_{kl}$ , получаем линейную систему уравнений относительно  $\sigma_j^2, j = G, R, M$ , решением которой суть величины

$$\sigma_G^2 = \frac{1}{4}(S_{GR} + S_{GM} - S_{RM} + D_{GR} + D_{GM} - D_{RM}),$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{4}(S_{GR} + S_{RM} - S_{GM} + D_{GR} + D_{RM} - D_{GM}),$$

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{4}(S_{GM} + S_{RM} - S_{GR} + D_{GM} + D_{RM} - D_{GR}).$$

Создавая разности величин  $S_{kl}$  и  $D_{kl}$ , получаем выражения для коэффициентов корреляции:

$$\rho_{GR} = \frac{S_{GR} - D_{GR}}{4\sigma_G\sigma_R},$$

$$\rho_{GM} = \frac{S_{GM} - D_{GM}}{4\sigma_G\sigma_M},$$

$$\rho_{RM} = \frac{S_{RM} - D_{RM}}{4\sigma_R\sigma_M}.$$

Перед вычислением внешних средних квадратичных ошибок и коэффициентов корреляции для устранения систематических ошибок координаты станций из решений  $MAO(R)$  и  $MAO(M)$  были переведены с помощью параметров преобразования Гельмерта (табл. 3) к системе координат, реализованной координатами станций из решения  $MAO(G)$ . Результаты сравнения решений  $MAO(G)$ ,  $MAO(R)$  и  $MAO(M)$  приведены в табл. 5. Видно, что значения внешних средних

**Таблица 5. Внешние средние квадратичные ошибки решений и коэффициенты корреляции**

Параметр	X	Y	Z
$\sigma_G$ , мм	1.2	0.5	1.8
$\sigma_R$ , мм	1.5	0.7	2.0
$\sigma_M$ , мм	0.3	0.3	0.3
$\rho_{GR}$	-0.989	-0.929	-0.997
$\rho_{GM}$	0.729	0.576	0.838
$\rho_{RM}$	-0.823	-0.837	-0.880

квадратичных ошибок решения  $MAO(G)$  меньше значений ошибок решения  $MAO(R)$ .

Итак, сравнение полученных решений  $MAO(G)$ ,  $MAO(R)$  и  $MAO(M)$  показало, что на данный момент ГЛОНАСС-решение по точности уступает GPS-решению, а включение ГЛОНАСС-спутников в обработку наблюдений перманентных станций, расположенных на севере Европы, практически не улучшает точности полученных координат.

1. Болотин С. Л., Литвин С. О. Порівняння об'єднаних 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. Красильников А. Орбитальная группировка ГЛОНАСС развёрнута полностью // Новости космонавтики. — 2012. — 22, № 1. — С. 24–27.
3. Хода О. А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія — 2011. — 17, № 6. — С. 45–53.
4. Bernese GPS Software Version 5.0. / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
5. Bruyninx C. Comparing GPS-only with GPS+GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network // GPS Solutions. — 2007. — 11, N. 2. — P. 97–106.
6. Guidelines for EPN Analysis Centres [Электронный ресурс] / Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau // Режим доступа: [http://epncb.oma.be/\\_documentation/guidelines/guidelines\\_analysis\\_centres.pdf](http://epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf)
7. IGS Products [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://igs.org/components/prods.html>

8. Ineichen D., Brockmann E., Schaer S. Processing combined GPS/GLONASS data at Swisstopo's local analysis center [Электронный ресурс] // Presented at EUREF 2008 Symposium. — Brussels. — 2008. — Режим доступа: [http://www.epncb.oma.be/\\_documentation/papers/eurefsymposium2008/processing\\_combined\\_gpsglonass\\_data\\_at\\_swisstopos.pdf](http://www.epncb.oma.be/_documentation/papers/eurefsymposium2008/processing_combined_gpsglonass_data_at_swisstopos.pdf)
9. 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.

Стаття надійшла до редакції 22.10.12

О. О. Хода

**ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБРОБКИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ GPS- І ГЛОНАСС-СПУТНИКІВ НА ПЕРМАНЕНТНИХ СТАНЦІЯХ, РОЗТАШОВАНИХ НА ПІВНОЧІ ЄВРОПИ**

Для мережі перманентних станцій, розташованих на півночі Європи, було отримано три розв'язки: з обробки спостережень тільки GPS-спутників, тільки ГЛОНАСС-спутників та спільної обробки спостережень GPS- і ГЛОНАСС-спутників. На основі порівняння повторюваності складових отриманих координат GPS/ГЛОНАСС-станцій та визначених зовнішніх середніх квадратичних похибок зроблено висновки, що на даний момент ГЛОНАСС-розв'язок по точності поступається GPS-розв'язку, а включення ГЛОНАСС-спутників в обробку спостережень перманентних станцій, розташованих у цьому регіоні, не покращує точності оцінки координат.

О. А. Khoda

**A COMPARISON OF PROCESSING RESULTS FOR GPS AND GLONASS SATELLITE OBSERVATIONS OBTAINED AT PERMANENT STATIONS IN THE NORTHERN EUROPE**

Three solutions are derived for the network of permanent stations located in the Northern Europe: from processing observations of only GPS satellites, only GLONASS satellites, and from the combined processing of observations of GPS and GLONASS satellites. From the comparison of repeatabilities of the obtained coordinates of GPS/GLONASS stations and determined outer RMS values it is concluded that, as for now, the GLONASS solution is less precise than GPS one and the inclusion of GLONASS satellites in the processing of observation data for stations located in this region do not improve the coordinate estimation precision.