

УДК 528.2:629.78+528.16

О. А. Хода

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного 27**Обработка наблюдений GPS-кампании
на Крымском геодинимическом полигоне
«Симеиз—Кацивели» в 2001 г.**

Представлены результаты обработки наблюдений GPS-кампании на Крымском геодинимическом полигоне «Симеиз—Кацивели» в 2001 г. Обработка данных проводилась с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2». Средние квадратичные ошибки горизонтальных координат составили 0.9—11.7 мм, вертикальной — 1.6—4.1 мм.

ОБРОБКА СПОСТЕРЕЖЕНЬ GPS-КАМПАНИЇ НА КРИМСЬКОМУ ГЕОДИНАМІЧНОМУ ПОЛІГОНІ «СІМЕЇЗ—КАЦІВЕЛІ» В 2001 Р., Хода О. О. — Представлені результати обробки спостережень GPS-кампанії на Кримському геодинимічному полігоні «Сімеїз—Кацівелі» в 2001 р. Обробку даних виконано за допомогою комплексу «Bernese GPS Software ver. 4.2». Середні квадратичні помилки горизонтальних координат склали 0.9—11.7 мм, вертикальної — 1.6—4.1 мм.

GPS CAMPAIGN IN CRIMEAN TEST AREA “SIMEIZ—KATSIVELY” IN 2001: DATA PROCESSING, by Khoda O. O. — The results of data analysis of GPS campaign in the Crimean Test Area “Simeiz—Katsively” in 2001 are presented. The data processing is carried out with Bernese GPS Software ver. 4.2. RMS errors of estimated coordinates are 0.9—11.7 mm in plane and 1.6—4.1 mm in height.

ВВЕДЕНИЕ

Об уникальности Крымского геодинимического полигона «Симеиз—Кацивели» написано много [7, 13]). Стоит отметить, что это единственный полигон в Украине, где находятся станции трех различных техник космической геодезии. Прежде всего это 22-м радиотелескоп РТ-22 (номер СDP: 7332, номер DOMEs: 12337S008), оснащенный системой регистрации MARK III, и две станции лазерной локации искусственных спутников Земли (ЛЛС) типа «Крым-3» [12]: 1873 Simeiz (номер DOMEs 12337S003) и 1893 Katsively (номер DOMEs 12337S006). Кроме того, здесь расположен грунтовой маркер SIME, к которому осуществлялась привязка референцной точки

мобильной станции ЛЛС в октябре—ноябре 1991 г. (CDP 7561, номер DOMES 12337M001) [12]. 27 апреля 2000 г. начались регулярные наблюдения на перманентной GPS-станции CRAO [4], которая находится рядом со станцией ЛЛС 1873 Simeiz.

На территории полигона расположен ряд грунтовых маркеров, которые использовались для определения локальных привязок между станциями космической геодезии как с помощью GPS [3], так и классическими геодезическими методами [1].

КАМПАНИЯ GPS-НАБЛЮДЕНИЙ

Кампания наблюдений GPS-спутников «Simeiz—Katsively’2001» была проведена 10—12 октября 2001 г. (дни года 283—285) Главной астрономической обсерваторией НАН Украины (ГАО) совместно с Украинским государственным аэрогеодезическим предприятием (УкрДАГП). Наблюдения проводились на пяти пунктах с помощью четырех комплектов аппаратуры фирмы «Trimble Navigation Ltd» (табл. 1). Схема расположения пунктов показана на рис. 1, список сессий наблюдения приведен в табл. 2. Видно, что сессии были спланированы таким образом, чтобы на каждом пункте было проведено минимум две сессии наблюдений, к тому же разными комплектами аппаратуры.

Кроме приведенных в табл. 2 сессий в день года 284 была организована дополнительная полуторачасовая сессия на пунктах KTRT, KTHI, KTE1 и KTE2 (последние два пункта находятся вблизи радиотелескопа РТ-22).

Рис. 1. Схема расположения пунктов на Крымском геодинамическом полигоне «Симеиз—Кацивели»

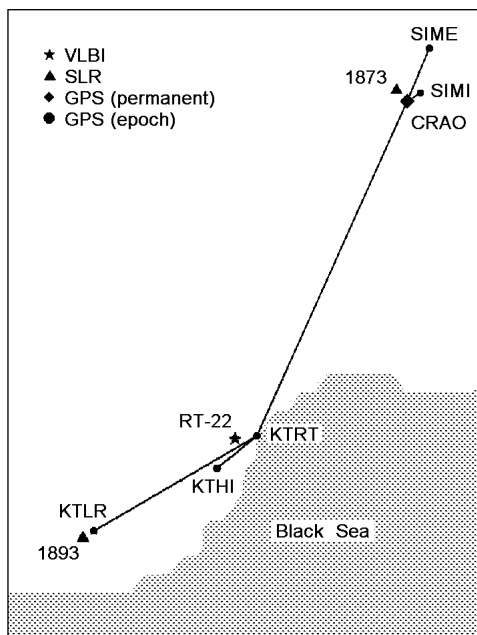


Таблица 1. Комплекты GPS-аппаратуры, использованные для наблюдений

Комплект	Номер приемника Trimble 4000SSE	Тип антенны (код IGS)	Номер антенны
A	09543	Geod. L1/L2 compact, with groundplane (TRM22020.00+GP)	10422
B	03217	4000ST L1/L2 Geodetic (TRM14532.00)	66678
C	03211	4000ST L1/L2 Geodetic (TRM14532.00)	66427
D	09490	Geod. L1/L2 compact, with groundplane (TRM22020.00+GP)	10421

Таблица 2. Сессии наблюдений (время в шкале GPS)

Пункт	Начало и конец наблюдений			Комплект аппаратуры		
	283	284	285	283	284	285
SIME	06:39—14:26	05:49—13:01	05:42—13:47	A	C	D
SIMI		05:57—12:50	05:47—13:50		B	C
KTRT	06:00—14:31	05:23—15:25	05:12—14:01	B	D	A*
KTLR	06:34—14:38	05:59—13:01		D	A	
KTHI	06:00—14:44		05:17—14:12	C		B

*Антенна без отражательной поверхности

Таблица 3. Станции сети IGS

Станция	Идентификатор	Номер DOMES	Страна	Приемник	Антенна	Высота антенны, м
Киев/Голосиив	GLSV	12356M001	Украина	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0,0000
Матера	MATE	12734M008	Италия	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.1010
Зеленчукская	ZECK	12351M001	Россия	AOA SNR-8000 ACT	LOAD/M_T	0.0450

Таблица 4. Координаты и скорости IGS-станций в системе координат ITRF2000 на эпоху 1997.0

Станция	X, м	Y, м	Z, м	V_X , м/год	V_Y , м/год	V_Z , м/год
GLSV	3512889.1137	2068979.7628	4888903.1407	-0.0175	0.0151	0.0076
MATE	4641949.7074	1393045.2714	4133287.3434	-0.0188	0.0191	0.0131
ZECK	3451174.8801	3060335.3132	4391955.5676	-0.0206	0.0167	0.0087

ОБЩАЯ СТРАТЕГИЯ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка полученных GPS-наблюдений была выполнена в Главной астрономической обсерватории НАН Украины с помощью комплекса «Bernese GPS Software ver. 4.2» [6].

Приведенный ниже вариант обработки был третьим (результаты первого варианта упоминаются в работе [9]). С учетом опыта предыдущих вариантов была выбрана следующая стратегия обработки. На первом этапе определялись координаты перманентной станции CRAO путем совместной обработки наблюдений на этой станции и наблюдений на трех станциях сети IGS, расположенных вокруг CRAO (табл. 3). Полученные координаты станции CRAO рассматривались как исходные на втором этапе, на котором определялись координаты пяти пунктов наблюдений данной GPS-кампании. На втором этапе использовались наблюдения только на частоте L1.

Координаты и скорости IGS-станций взяты из каталога ITRF2000 (ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub/itrf/itrf2000/ITRF2000_EUR_GPS_PERM.SNX.gz, табл. 4).

Координаты приведены в систему координат ITRF97 к средней эпохе наблюдений 11 октября 2001 г. 12 ч 00 мин (время в шкале GPS). Полученные значения координат показаны в табл. 5.

Для обработки использовались комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли для GPS-недели 1135, полученные IGS (<ftp://igs.ifag.de/ORBITS/1135/>). Вариации фазовых центров GPS-антенн взяты из стандартного файла IGS (ftp://ftp.epncb.oma.be/pub/station/general/igs_01.pcv).

Таблица 5. Координаты IGS-станций в системе координат ITRF97 на эпоху 11 октября 2001 г. 12 ч 00 мин (время в шкале GPS)

Станция	X, м	Y, м	Z, м
GLSV	3512889.0413	2068979.8428	4888903.1594
MATE	4641949.6310	1393045.3699	4133287.3877
ZECK	3451174.7928	3060335.4029	4391955.5908

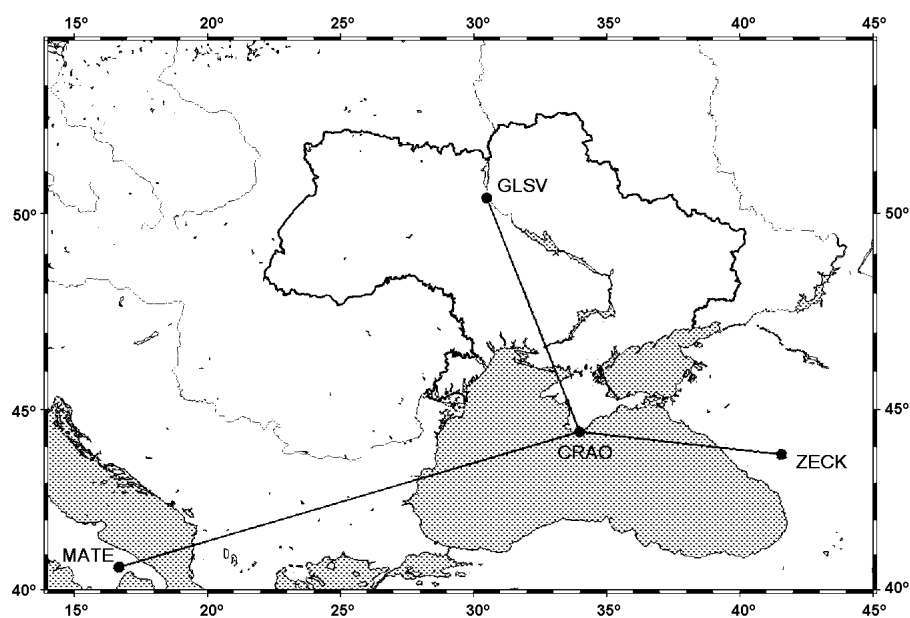


Рис. 2. Перманентные станции

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПЕРМАНЕНТНОЙ СТАНЦИИ CRAO

Для определения координат станции CRAO были взяты файлы наблюдений на трех перманентных станциях сети IGS (Киев/Голосеево (GLSV), Матера (MATE), Зеленчукская (ZECK)) для дней года 282—286. Информация об этих станциях приведена в табл. 3, а их расположение показано на рис. 2.

Процедура предварительной обработки этой минисети не отличалась от процедуры, приведенной в [5]. Априорные координаты станции CRAO, взятые из заголовка одного из RINEX-файлов, постепенно уточнялись отдельно для каждой сессии при обработке кодовых наблюдений отдельно на каждой станции (при этом определялись поправки к часам GPS-приемников на станциях), при проверке качества фазовых наблюдений в сформированных файлах первых разностей, при вычислении решений на фазовой комбинации L3 с действительными значениями фазовых неоднозначностей (с сохранением файлов нормальных уравнений). В последнем случае использовались очищенные наблюдения спутников с минимальным углом места 10° со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Тропосферные параметры определялись на каждый час наблюдений для каждой станции. Использовалась опция DRY_NIELL, задающая функцию наклона $pmfh2.0$ [10]. На координаты станций GLSV, MATE и ZECK были наложены жесткие ограничения (0.1 мм).

Таблица 6. Характеристики решений

Вариант решения	Количество наблюдений	Количество неизвестных	СКО, мм
CRAO—AFC0	174146	1531	0.9
CRAO—AFC1	142776	1229	0.9
CRAO—FIN0	174146	838	1.0
CRAO—FIN1	142776	663	1.0
SK—FIN	66252	44	4.2

Таблица 7. Повторяемость координат перманентной станции CRAO (N — северная, E — восточная, U — высотная), мм

Вариант решения	Составляющая	СКО	День года				
			282	283	284	285	286
CRAO—AFC0	N	2.6	0.0	0.4	-3.2	4.0	-1.0
	E	1.9	0.5	-0.1	-1.8	2.7	-1.9
	U	10.3	3.7	2.3	6.7	-18.7	2.9
CRAO—AFC1	N	1.6	1.0	1.4	-2.2		0.0
	E	1.2	1.4	0.8	-0.9		-1.0
	U	1.9	-0.1	-1.5	2.8		-0.9
CRAO—FIN0	N	3.0	-1.2	-0.6	-3.0	5.0	0.1
	E	0.8	0.9	0.3	0.2	-0.3	-1.2
	U	10.3	3.9	5.4	5.5	-18.8	0.1
CRAO—FIN1	N	1.3	0.0	0.5	-1.8		1.3
	E	0.9	0.8	0.2	0.1		-1.2
	U	2.5	0.3	1.7	1.9		-3.5

После уравнивания нормальных уравнений для этих решений было получено итоговое решение с действительными значениями фазовых неоднозначностей (обозначим его CRAO—AFC0). Характеристики решения приведены в табл. 6. На основе анализа повторяемости компонент координат (табл. 7) было решено исключить из уравнивания наблюдения в день года 285. Видно, что повторяемость составляющих координат нового решения (CRAO—AFC1) значительно улучшилась.

Координаты станции CRAO из решения CRAO—AFC1 использовались далее в качестве априорных при определении фазовых неоднозначностей с помощью методики QIF [8] с использованием тропосферных параметров, полученных на этапе предварительной обработки, и детерминистических моделей ионосферы [11], основанных на разложении общего содержания электронов в ряд по сферическим гармоникам в зависимости от географической широты и часового угла Солнца. Было разрешено 66.7 % неоднозначностей.

Для получения финальных решений на фазовой комбинации L3 для каждой сессии использовались наблюдения спутников с минимальным углом места 10° со взвешиванием фазовых измерений в зависимости от угла места. Тропосферные параметры определялись на каждый час наблюдений для каждой станции. Опция, задающая функцию наклона — DRY_NIELL. На координаты станций GLSV, MATE и ZECK были наложены жесткие ограничения (0.1 мм). Сохранялись файлы нормальных уравнений. Уравнивание последних дало финальное решение CRAO—FIN0. Как и для решения с действительными значениями фазовых неоднозначностей, на основе анализа повторяемости координат (табл. 7) было решено исключить из уравни-

Таблица 8. Координаты станции CRAO, решение CRAO—FIN1, система координат ITRF97, эпоха 11 октября 2001 г. 12 ч 00 мин (время в шкале GPS)

X, м Y, м Z, м	СКО, м	Высота, м Широта Долгота	СКО, м
3783897.1888	0.0002	365.7910	0.0004
2551404.3725	0.0002	44°24'47.732595"	0.0001
4441264.2234	0.0003	33°59'27.532187"	0.0000

Таблица 9. Повторяемость длин баз между перманентными станциями

День года	Длина базы, м		
	GLSV—CRAO	MATE—CRAO	ZECK—CRAO
282	711729.9069	1474075.7464	610037.9716
283	711729.9063	1474075.7460	610037.9723
284	711729.9085	1474075.7456	610037.9722
286	711729.9048	1474075.7442	610037.9736
Средняя	711729.9066	1474075.7456	610037.9724

Таблица 10. Высоты антенн

Пункт	День года	Средняя наклонная высота, м	Истинная вертикальная высота, м
SIME	283	1.5128	1.4356
KTRT	283	1.1550	1.0685
KTHI	283	1.3140	1.2301
KTLR	283	3.2500*	3.1776
SIME	284	1.4000	1.3175
KTRT	284	1.1460	1.0623
SIMI	284	1.4050	1.3228
KTLR	284	3.4445*	3.3842
SIME	285	1.3270	1.2477
KTRT	285	1.1205	1.0577
KTHI	285	1.1060	1.0188
SIMI	285	1.4760	1.3944

Высота измерялась без отражающей поверхности.

вания наблюдения в день года 285. Обозначим это новое решение CRAO—FIN1. Характеристики решений CRAO—FIN0 и CRAO—FIN1 приведены в табл. 6.

Таким образом были определены координаты станции CRAO (табл. 8). Об их точности можно судить по повторяемости компонент координат (табл. 7) и длин баз (табл. 9).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ПУНКТОВ НА КРЫМСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ «СИМЕИЗ—КАЦИВЕЛИ»

Следующим этапом была обработка наблюдений на пунктах полигона «Симеиз—Кацивели». Измеренные наклонные высоты антенн на пунктах наблюдения были приведены к истинным вертикальным высотам (табл. 10).

Предварительная обработка данных проводилась в том же порядке и с теми же параметрами, что и на первом этапе. Главные отличия состояли в том, что использовались наблюдения только на частоте L1, использовались

Таблица 11. Финальное решение, частота L1, система координат ITRF97, эпоха 11 октября 2001 г. 12 ч 00 мин (время в шкале GPS)

Пункт	X, м	СКО, м	Высота, м	СКО, м
	Y, м		Широта	
	Z, м		Долгота	
KTRT	3785160.8451	0.0006	25.8570	0.0009
	2551262.2340	0.0004	44°23'51.656554"	0.0002
	4439789.7698	0.0006	33°58'50.283900"	0.0001
SIME	3783746.3781	0.0006	386.4414	0.0010
	2551362.7226	0.0004	44°24'55.281326"	0.0001
	4441445.1201	0.0007	33°59'29.782132"	0.0001
KTHI	3785378.5762	0.0006	65.5193	0.0010
	2551165.3702	0.0004	44°23'47.115033"	0.0002
	4439717.3569	0.0007	33°58'41.155703"	0.0001
KTLR	3785923.8702	0.0006	63.5024	0.0010
	2550781.7844	0.0004	44°23'36.033864"	0.0002
	4439471.5448	0.0007	33°58'13.013617"	0.0001
SIMI	3783887.4328	0.0007	361.4824	0.0012
	2551403.5278	0.0005	44°24'47.986432"	0.0002
	4441266.8051	0.0008	33°59'27.747047"	0.0001

Таблица 12. Повторяемость координат пунктов Крымского геодезического полигона «Симеиз — Кацивели» (N — северная составляющая, E — восточная, U — высотная), мм

Пункт	Составляющая	СКО	День года		
			283	284	285
KTRT	N	5.7	2.7	3.9	-6.4
	E	2.1	2.6	-1.4	-0.2
	U	2.9	2.5	2.7	-1.9
SIME	N	11.7	7.3	6.5	-13.3
	E	10.5	9.7	2.0	-10.9
	U	3.3	-3.9	2.2	1.4
KTHI	N	10.6	5.0		-9.3
	E	2.7	2.5		-1.0
	U	3.5	-0.3		3.5
KTLR	N	6.1	1.7	5.8	
	E	2.1	2.0	0.7	
	U	4.1	3.3	-2.4	
SIMI	N	2.3		-1.5	-1.7
	E	2.0		-1.4	-1.5
	U	1.6		1.6	0.1

модель тропосферной зенитной задержки Саастамойнена [6] и модели ионосферы, полученные на первом этапе обработки.

Из-за того, что методика QIF не применима при обработке наблюдений на кросс-корреляционных приемниках, какими являются «Trimble 4000SSE», фазовые неоднозначности определялись с помощью методики SIGMA [6]. Было разрешено 94.2 % неоднозначностей.

Финальные решения для каждой сессии были получены со следующими параметрами: использовались наблюдения спутников с минимальным углом места 20°, применялись модели ионосферы (модели тонкого слоя), полученные при первом варианте обработки данной кампании, определялся всего один тропосферный параметр на каждую сессию для каждой станции, на координаты станции CRAO были наложены жесткие ограничения (0.1 мм).

Таблица 13. Повторяемость длин баз на Крымском геодинамическом полигоне «Симеиз—Кацивели»

День года	Длина базы, м					
	CRAO—KTRT	CRAO—SIME	CRAO—SIMI	KTRT—КТНІ	KTRT—КТLR	SIME—KTRT
283	1947.0564	239.1786		249.0628	956.1947	2179.6846
284	1947.0569	239.1768	10.1246		956.1907	2179.6823
285	1947.0664	239.1547	10.1250	249.0676		2179.6687
Средняя	1947.0582	239.1731	10.1248	249.0642	956.1931	2179.6814

Уравнивание полученных нормальных уравнений дало финальное решение SK—FIN. К сожалению, из окончательного уравнивания пришлось исключить наблюдения дополнительной сессии в день года 284. Небольшая длительность сессии, плохие условия наблюдения на пунктах КТЕ1 и КТЕ2, сильная зашумленность данных привели к низкой точности оценки координат для этой сессии.

Характеристики решения показаны в табл. 6, полученные координаты пунктов Крымского геодинамического полигона «Симеиз—Кацивели» — в табл. 11, повторяемость компонент координат — в табл. 12, повторяемость длин баз — в табл. 13.

Сравним координаты пунктов из данного решения и решения для кампании 1994 г. [3]. Приведем все координаты к одной системе отсчета, скажем ITRF92 на эпоху 1988.0. Координаты пунктов совпадают в пределах ошибок. Обольщаться этим результатом не стоит, так как слишком велики ошибки скоростей сайта 12337 «Симеиз—Кацивели» из каталогов ITRF97 и ITRF94.

Используем параметры эксцентриситетов между GPS-пунктами и референсными точками радиотелескопа и станций ЛЛС из [1]. Таким образом, есть возможность определить координаты РТ-22 и станций ЛЛС и сравнить их значения с каталожными. К сожалению, некоторые разности достаточно велики (1–2 см). Эти различия можно объяснить влиянием как природной активности, так и человеческой деятельности.

Пункт KTRT расположен на волнорезе и не может считаться устойчивым ввиду достаточно сильных зимних штормов (недалеко от пункта находится волнорез, разрушенный штормом зимой 1992—1993 гг.). Пункт KTLR со всех сторон окружен деревьями, которые подросли со времени кампании 1994 г., тем самым значительно ухудшив условия наблюдений и повлияв на качество данных. По сообщениям сотрудников Симеизской станции Крымской астрофизической обсерватории пункт SIMI смещен на несколько сантиметров от места первоначальной закладки, скорее всего из-за нагрузок от проходящей рядом дороги. Координаты пункта SIME, входящего в сеть UKRREF [14], регулярно определяются в НИИ геодезии и картографии (см., например, [2]). Их анализ позволяет говорить о движении горы, на которой расположен данный пункт. Это движение вполне могло возникнуть после проведения строительных работ в начале 1990-х гг. Активно ведущееся строительство на холме возле радиотелескопа повлияло и на устойчивость пункта КТНІ. Так, были сняты слои грунта на вершине холма и уничтожен один из дополнительных маркеров, а основной маркер оказался на узкой полоске грунта.

Вышесказанное дает возможность говорить о необходимости закладки новых устойчивых пунктов на полигоне и проведении новых кампаний GPS-наблюдений и измерений классическими геодезическими методами.

1. *Самойленко А. Н.* Локальная геодезическая сеть на Симеизском геодинамическом полигоне. — Киев, 1996.—36 с.—(Препринт / НАН Украины. Главная астрономическая обсерватория; ГАО-96-1Р).
2. *Стопхай Ю., Висотенко Р.* Обробка GPS-спостережень, виконаних на пунктах фундаментальної геодезичної мережі України в 2000 році // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. — Львів: Ліга—Прес, 2003.—С. 48—54.
3. *Хода О. А.* Наблюдение спутников Глобальной системы определения местоположения (GPS) для геодинамических и ионосферных исследований в Украине: Дис... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2000.—126 с.—Машинопись.
4. *Хода О. О.* Створення та функціонування мережі перманентних GPS-станцій в Україні // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 4.—С. 83—86.
5. *Хода О. А.* Центр анализа GPS-данных в ГАО НАН Украины: тестовые результаты // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 70—78.
6. *Bernese GPS Software Version 4.2 / Eds U. Hugentobler, S. Schaer, P. Fridez.* — Berne: Astron. Inst., Univ. of Berne, 2001.—515 p.
7. *Bolotin S., Gaiovitch I., Khoda O., et al.* GPS observational campaign in the geodynamical test area «Simeiz—Katsiveli»: data processing and results // Космічна наука і технологія. Додаток до журн.—1995.—1, № 2.—С. 3—16.
8. *Mervart L.* Ambiguity resolution techniques in geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System: Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. — Bern, 1995.—155 p.
9. *Nesterov N., Volvach A.* Geodetic study at the Simeiz IVS station // IVS Annual Report 2001.—2002.—NASA/TP-2002-210001.—P. 115—118.
10. *Niell A. E.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res.—1996.—101, N B2.—P. 3227—3246.
11. *Schaer S., Beutler G., Mervart L., et al.* Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable // Proc. 1995 IGS Workshop “The IGS: special topics and new directions”. — Potsdam, 1995.—P. 77—92.
12. *Tatevian S., Stirberg L.* On the role of Simeis Geodynamical Observatory in the WEGENER project // Abstracts, presentations and reports from the Sixth General Assembly of WEGENER. — St. Petersburg, 1994.—P. 41—44.
13. *Tatevian S. K., Stirberg L. S.* Collocation of different Space geodesy technique at the Simeiz geodynamical observatory // Proc. International workshop on geodetic measurements by the collocation of space techniques on Earth (GEMSTONE). — Tokyo, 1999.—P. 45—49.
14. *Zablotsky F. F., Dultsev A. T., Romanyshyn P. O., Czeremshinsky M. D.* On the development of the EUREF network in Ukraine // Repts Geod.—1995.—N 3 (16).—P. 205—209.—(Proc. 3rd Internat. Sem. on “GPS in Central Europe”).

Поступила в редакцію 15.06.04