

УДК 521.96

**С. О. Литвин**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного 27  
e-mail: slytvyn@mao.kiev.ua

### **Порівняння об'єднаного та індивідуальних каталогів положень радіоджерел**

*Виконано порівняння об'єднаного та індивідуальних каталогів положень радіоджерел, створених у рамках підготовки ICRF2. Показано відмінності між каталогами та виконано «зовнішнє» оцінювання їхньої точності.*

*СРАВНЕНИЕ СВОДНОГО И ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КАТАЛОГОВ ПОЛОЖЕНИЙ РАДИОИСТОЧНИКОВ, Литвин С. О. — Проведено сравнение сводного и индивидуальных каталогов положений радиоисточников, созданных в рамках подготовки ICRF2. Показаны отличия между каталогами и проведена «внешняя» оценка их точности.*

*THE COMPARISON OF COMBINED AND INDIVIDUAL CATALOGUES OF RADIO SOURCE POSITIONS, by Lytvyn S. O. — We compared the combined and individual catalogues of radio source positions which were compiled during the ICRF2 preparation. Some distinctions between the compared catalogues are shown and their «external» standard deviations are estimated.*

#### **ВСТУП**

Загальноприйнято визначати положення та рухи небесних тіл, в тому числі Землі, відносячи їх до небесної системи координат (НСК). До 1998 р. в астрономії та суміжних науках як НСК використовувалася фундаментальна система координат (ФСК), яка була середньою екваторіальною системою координат на певну епоху. Осі такої системи були орієнтовані на середній небесний полюс та середню точку весня-

ного рівнодення. Реалізаціями ФСК були фундаментальні каталоги положень та власних рухів певної кількості зір. Точність реалізації ФСК складала приблизно 20 мсд (мілісекунд дуги) для положень та 1 мсд/століття для власних рухів (див. [3]). Така точність не задовольняла потреб астрономічних та космічних досліджень кінця ХХ ст., тому Міжнародний астрономічний союз, починаючи з 1988 р., прийняв низку резолюцій щодо побудови нової реалізації НСК. Це стало можливим завдяки появі та розвитку радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ). Перевага РНДБ полягає в тому, що спостерігаються настільки віддалені джерела радіовипромінювання, що їхніми власними рухами можна знехтувати, а точність реалізації НСК у радіодіапазоні на порядок вища, ніж у ФСК. У 1998 р. міжнародним стандартом НСК була прийнята Міжнародна небесна система координат ICRS (International Celestial Reference System) та її реалізація — ICRF (International Celestial Reference Frame). Вона налічувала координати 608 радіоджерел, які умовно були поділені на три групи. 212 джерел задавали орієнтацію системи і були вибрані таким чином, щоб дана реалізація узгоджувалася із ФСК у межах похибок останньої. Також ці джерела повинні були мати хорошу історію спостережень, високу точність оцінки координат та високу стабільність. Вони отримали назву визначальних радіоджерел. Другу групу складала 294 радіоджерела, що називалися кандидатами. Ці джерела частково задовольняли перелічені вище умови, і вважалося, що у перспективі вони також зможуть задавати орієнтацію системи. Остання група із 102 радіоджерел називалася інші, які були додані до каталогу для якомога рівномірнішого і щільнішого заповнення небесної сфери.

На основі нових даних РНДБ-спостережень та досконаліших моделей їхньої обробки згодом було створено два розширення даної реалізації — ICRF-Ext.1 та ICRF-Ext.2. Але це не дало значного покращення точності ICRF, і тому у 2005 р. розпочалася кампанія зі створення нової реалізації Міжнародної системи координат ICRF2. Дана програма тривала до червня 2009 р. Протягом цих років робоча група IVS (International VLBI Service) ініціювала отримання каталогів радіоджерел, використовуючи різні незалежні програмні комплекси обробки РНДБ-спостережень, аналіз часових серій положень радіоджерел для вибору стабільних джерел, а також порівняння різних каталогів.

Активну участь у діяльності цієї робочої групи брав Центр аналізу та обробки РНДБ-даних Головної астрономічної обсерваторії НАН України. Було отримано спеціальний розв'язок РНДБ-спостережень, відомий як MAO-розв'язок, обчислено часові ряди координат радіоджерел, створено об'єднаний каталог положень радіоджерел, а також виконано порівняння індивідуальних каталогів, отриманих іншими центрами аналізу IVS, між собою та з об'єднаним каталогом.

Робота присвячена порівнянню різних каталогів координат радіоджерел.

## ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛОГІВ

Для дослідження та порівняння ми використали РНДБ-каталоги, які були надані сімома центрами аналізу РНДБ-даних. На їхній основі ми створили об'єднаний каталог, який також включено до процедури порівняння. Після попереднього аналізу з індивідуальних каталогів були виключені деякі радіоджерела, які надалі не враховувалися. З розгляду виключався кожен «двійник», тобто радіоджерело, включене у каталог двічі під різними назвами. Наприклад, у каталозі aus007 одне і те ж джерело включене під назвами 0218+357 та 0218+35A. Виключалися також радіоджерела, які спостерігалися лише кілька разів, проте мають надзвичайно малі середні квадратичні похибки визначення координат.

У табл. 1 подано загальні характеристики каталогів. В другій та третій графах табл. 1 вказано кількість радіоджерел у каталозі до і після попереднього аналізу. Порівнюючи значення кількості джерел у об'єднаному та індивідуальних каталогах, бачимо, що жоден індивідуальний каталог не містить повного набору джерел, зібраних в об'єднаному каталозі. У той же час є 169 радіоджерел, координати яких надані лише одним індивідуальним каталогом (28 — bkg001a, 2 — gsf007b, 2 — iaa008c і 139 — ma0008a). Це спричинено в основному різними опціями обробки, які були застосовані центрами аналізу і включенням різних сесій у розв'язки.

Об'єднаний каталог, ma0C08a, було створено за допомогою розробленого в Головній астрономічній обсерваторії НАН України методу дуг [2]. Щоб задати орієнтацію об'єднаного каталогу, із усіх індивідуальних каталогів було вибрано спільні для всіх розв'язків визначальні радіоджерела. Орієнтація системи задавалася координатами 204 об'єктів. Із загальної кількості 212 визначальних радіоджерел, які задають орієнтацію ICRF, було виключено вісім джерел: сім з них входять до списку джерел, запідозрених в нестабільності (0014+813, 0235+164, 0637-752, 0738+313, 1308+326, 1448+762 і 2145+067) та одне джерело (1903-802), які відсутні у bkg001a-розв'язку.

**Таблиця 1.** Загальні характеристики РНДБ-каталогів

Назва каталогу	Кількість джерел		Програмний комплекс	Центр аналізу
aus007a	1564	1516	OCCAM6.2	GA
bkg001a	3019	2978	CALC 10.00, SOLVE rev. 2007.10.31	BKG
gsf007b	3414	3378	CALC 10.00/10.01, SOLVE rev. 2008.12.05	GSFC
iaa008c	2961	2918	QUASAR	IAA
ma0008a	3555	3512	SteelBreeze	MAO
opa008b	3244	3214	CALC 10.0, SOLVE rev. 2008.12.05	OP
usn010b	3414	3380	CALC 10.0, SOLVE rev. 2007.11.08	USNO
ma0C08a	3572	3572	об'єднаний	MAO

## ПОРІВНЯННЯ КАТАЛОГІВ РАДІОДЖЕРЕЛ

Порівняння каталогів радіоджерел здійснювалося в кілька кроків.

1. Методом найменших квадратів оцінювалися параметри моделі перетворення між системами двох каталогів (див. (1)).

2. Модель (1) застосовувалася до координат одного з каталогів, щоб привести в систему другого і знайти їхні різниці, а потім обчислювалися зважені середні квадратичні залишки прямого піднесення і схилення.

3. Із порівняння трьох каталогів — об'єднаного і двох індивідуальних — було проведено так зване «зовнішнє» оцінювання точності каталогів радіоджерел.

## МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ МІЖ ДВОМА СИСТЕМАМИ КАТАЛОГІВ РАДІОДЖЕРЕЛ

Для перетворення ми використали дещо змінену модель IERS [5]. Дана модель враховує обертання і деформацію систем координат, а також розглядає деякі систематичні ефекти, що можуть виникнути через застосування різних моделей в аналізі РНДБ-спостережень. Вона відрізняється від IERS останніми членами в рівняннях.

**Таблиця 2. Порівняння каталогу ma0C08a з індивідуальними розв'язками**

$A_1$ , мксд	$A_2$ , мксд	$A_3$ , мксд	$D$ , мксд/рад	$D$ , мксд/рад	$B$ , мксд	$C$ , мксд	, град	$C$ , мксд	, град
ma0C08a — aus007a									
-36.6	83.2	-39.4	-44.4	-42.0	53.2	25.6	242.2	26.7	167.9
±39.1	±33.0	±24.1	±39.4	±21.4	±18.3	±33.6	±65.4	±43.6	±78.9
ma0C08a — bkg001a									
-34.2	13.9	-14.4	-5.2	13.0	-30.0	9.2	146.3	13.2	128.3
±6.8	±6.0	±4.1	±7.2	±4.8	±4.3	±5.0	±34.9	±7.7	±30.6
ma0C08a — gsf007b									
-1.2	-3.4	0.3	-0.9	11.2	-2.2	8.9	185.8	1.8	79.5
±5.2	±4.6	±3.3	±5.6	±3.5	±3.1	±4.2	±27.1	±5.3	±181.4
ma0C08a — iaa008c									
-7.1	11.9	5.0	21.3	-16.7	2.5	7.5	225.8	9.4	305.8
±7.8	±6.9	±5.1	±8.6	±5.4	±4.8	±6.8	±46.3	±8.8	±49.2
ma0C08a — ma008a									
8.8	-25.3	-6.6	1.1	-24.5	24.5	19.2	148.7	7.2	53.3
±8.8	±7.9	±6.0	±9.7	±5.9	±5.3	±7.1	±23.9	±9.1	±81.6
ma0C08a — opa008b									
9.6	-11.8	2.3	-0.8	18.6	-12.1	5.4	191.5	6.3	73.3
±6.3	±5.6	±4.1	±6.8	±4.2	±3.7	±5.2	±54.6	±6.5	±65.4
ma0C08a — usn010b									
-6.3	26.4	7.4	2.7	3.6	-1.6	33.7	350.5	18.2	259.5
±6.5	±5.7	±4.2	±7.0	±4.5	±4.0	±5.2	±9.2	±6.7	±23.3

Різниці у прямому піднесенні та схиленні описуються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} A_1 \operatorname{tg} \cos \quad A_2 \operatorname{tg} \sin \quad A_3 \quad D ( \quad 0 ) \quad C \sin( \quad ), \\ A_1 \sin \quad A_2 \cos \quad D ( \quad 0 ) \quad B \quad C \sin( \quad ), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $A_1, A_2$  і  $A_3$  — малі кути повороту навколо трьох осей;  $D$  і  $D$  — коефіцієнти, що характеризують зміни різниць прямих піднесень і схилень у залежності від схилення;  $B$  — поправка системи схилень для екваторіальної зони;  $C, C$  — амплітуди гармонічних коливань у прямому піднесенні і схиленні як функції прямого піднесення;  $,$  фази гармонічних коливань в прямому піднесенні і схиленні.

Для обчислення параметрів моделі використано координати спільних для обох каталогів визначальних радіоджерел.

У табл. 2 наведено результати порівняння індивідуальних каталогів із об'єднаним. Перші рядки для кожної пари каталогів — оцінені значення параметрів моделі перетворення, другі рядки — відповідні середні квадратичні похибки. Як видно з табл. 2, каталог aus007a має найбільші відмінності від об'єданого майже за всіма параметрами. Для решти шести каталогів повороти і деформації відносно об'єданого каталогу є незначними.

Результати порівняння індивідуальних каталогів між собою наведено в табл. 3. Видно, що при порівнянні каталогу aus007a з іншими індивідуальними, більшість стандартних відхилень того ж значення, або навіть більші за відповідні значення самих параметрів. Це свідчить про те, що даний розв'язок значно відрізняється від інших, а параметри перетворення не можна оцінити з належною достовірністю. Крім того, параметри  $C$  та  $C$  майже для всіх пар каталогів несуттєві, за винятком пар каталогу usn010b із іншими каталогами. Це, швидше

**Таблиця 3. Порівняння каталогів: взаємне порівняння індивідуальних каталогів**

$A_1,$ мксд	$A_2,$ мксд	$A_3,$ мксд	$D,$ мксд/рад	$D,$ мксд/рад	$B,$ мксд	$C,$ мксд	$,$ град	$C,$ мксд	$,$ град
aus007a — bkg001a									
3.4	-64.3	25.7	39.9	45.9	-75.1	33.8	86.8	18.4	34.8
±30.6	±27.6	±19.9	±33.8	±22.0	±19.0	±25.1	±41.8	±32.1	±112.6
aus007a — gsf007b									
33.8	-89.7	40.7	41.4	48.2	-50.1	30.4	82.2	19.1	14.8
±33.4	±30.3	±22.8	±37.5	±24.0	±20.7	±28.8	±52.1	±36.3	±113.8
aus007a — iaa008c									
26.5	-73.7	42.3	57.0	8.2	-34.6	23.9	70.5	21.2	352.3
±31.6	±28.5	±21.8	±35.7	±22.8	±19.9	±28.0	±61.3	±36.3	±91.0
aus007a — mao008a									
44.9	-117.0	34.3	43.4	5.7	-16.2	37.5	93.0	25.5	36.1
±35.1	±32.1	±24.9	±39.9	±25.1	±22.1	±30.4	±47.3	±36.8	±93.5
aus007a — opa008b									
46.5	-100.9	43.3	41.5	53.3	-58.2	29.4	72.0	24.3	25.2
±34.8	±31.6	±23.9	±39.0	±24.6	±21.2	±30.9	±55.1	±36.9	±95.1

Закінчення табл. 3.

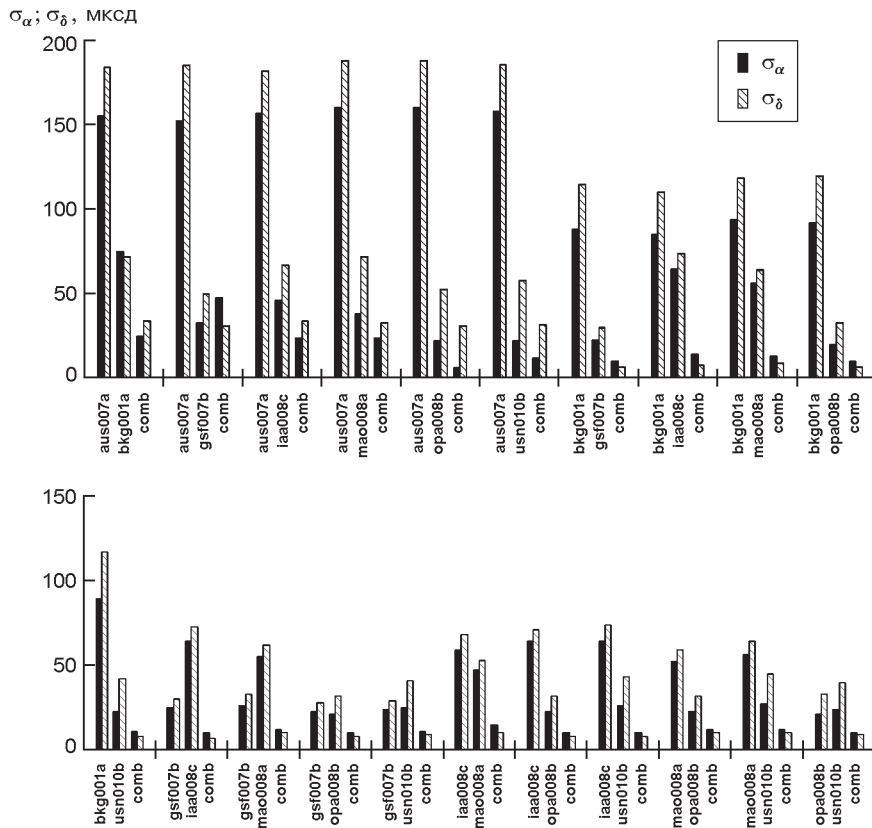
$A_1$ , мксд	$A_2$ , мксд	$A_3$ , мксд	$D$ , мксд/рад	$D$ , мксд/рад	$B$ , мксд	$C$ , мксд	$\alpha$ , град	$C$ , мксд	$\alpha$ , град
aus007a — usn010b									
26.4	-58.2	50.7	48.9	39.2	-47.4	49.5	30.7	22.1	296.7
±33.6	±30.3	±22.8	±37.6	±24.4	±21.1	±29.8	±30.5	±38.9	±92.1
bkg001a — gsf007b									
29.9	-19.3	14.9	4.0	-3.5	30.0	2.6	257.7	8.4	308.9
±6.6	±6.1	±4.3	±7.6	±5.3	±4.7	±5.5	±115.2	±7.9	±49.2
bkg001a — iaa008c									
25.1	-4.2	19.7	24.5	-31.2	34.4	10.8	287.3	19.5	306.8
±7.8	±7.1	±5.2	±9.0	±6.1	±5.4	±6.3	±35.5	±9.2	±24.8
bkg001a — mao008a									
36.0	-44.0	5.7	2.0	-37.7	54.8	12.1	120.8	4.6	358.1
±10.1	±9.3	±6.9	±11.6	±7.8	±6.9	±7.9	±42.9	±11.6	±140.8
bkg001a — opa008b									
41.4	-29.0	17.8	5.4	2.5	21.2	5.2	323.4	6.9	351.8
±6.9	±6.4	±4.6	±7.9	±5.5	±4.8	±5.4	±65.5	±8.1	±63.8
bkg001a — usn010b									
22.9	11.0	22.0	7.2	-11.7	30.6	41.7	351.6	26.7	269.9
±7.5	±6.8	±4.9	±8.5	±6.0	±5.3	±6.0	±8.4	±8.4	±18.5
gsf007b — iaa008c									
-5.2	15.2	5.6	22.6	-26.6	3.5	7.7	297.1	11.1	302.6
±7.1	±6.4	±4.9	±8.2	±5.5	±4.9	±5.6	±46.7	±8.3	±39.3
gsf007b — mao008a									
7.9	-23.1	-7.1	1.7	-36.2	27.0	13.7	122.5	4.7	71.8
±7.3	±6.7	±5.1	±8.4	±5.6	±5.0	±5.8	±28.2	±8.0	±103.7
gsf007b — opa008b									
10.9	-9.5	2.6	0.6	6.0	-8.6	4.5	359.0	5.6	74.7
±2.5	±2.3	±1.7	±2.9	±1.9	±1.7	±2.1	±26.4	±2.7	±29.9
gsf007b — usn010b									
-7.1	30.5	7.6	3.9	-7.8	0.9	41.3	355.1	20.9	255.1
±4.5	±4.1	±3.0	±5.2	±3.6	±3.1	±3.7	±5.2	±4.9	±14.4
iaa008c — mao008a									
12.4	-38.7	-14.1	-23.8	-7.1	21.7	21.8	119.3	16.3	113.9
±9.3	±8.5	±6.6	±10.8	±7.1	±6.3	±7.5	±22.4	±10.9	±35.9
iaa008c — opa008b									
16.6	-25.1	-3.2	-22.1	33.2	-12.7	6.7	79.5	15.3	106.3
±7.2	±6.6	±5.0	±8.4	±5.5	±4.9	±6.3	±51.3	±8.3	±30.0
iaa008c — usn010b									
-2.6	15.9	1.9	-18.9	18.0	-2.0	37.4	5.4	16.5	224.5
±8.4	±7.6	±5.8	±9.7	±6.5	±5.8	±7.2	±10.7	±8.9	±34.3
mao008a — opa008b									
2.2	13.4	9.2	-2.1	43.8	-37.0	16.4	316.9	1.1	124.7
±7.2	±6.7	±5.1	±8.4	±5.5	±4.9	±5.8	±23.7	±8.6	±399.4
mao008a — usn010b									
-14.7	53.6	15.6	3.6	29.7	-27.0	50.6	342.0	25.3	255.0
±8.5	±7.8	±6.0	±9.9	±6.6	±5.9	±7.1	±8.6	±9.4	±22.7
opa008b — usn010b									
-17.5	39.9	5.1	3.5	-13.6	9.3	37.0	354.1	26.2	255.9
±4.4	±4.1	±3.0	±5.1	±3.5	±3.1	±3.7	±5.8	±4.9	±11.4

Таблиця 4. Зважені нев'язки після перетворення ( $\cos \delta$ ), мксд

ID	aus007a	bkg001a	gsf007b	iaa008c	mao008a	opa008b	usn010b
mao008a	155	208	39	37	27	30	45
aus007a		137	200	141	218	139	204
bkg001a			40	39	47	46	59
gsf007b				49	64	41	46
iaa008c					59	52	46
mao008a						41	46
opa008b							46
usn010b							24

за все, зумовлено тим, що при побудові каталогу usn010b було використано інші моделі для оцінюваних параметрів.

Після того як модель перетворення була застосована до всіх розв'язків, було отримано зважені нев'язки (табл. 4). Видно, що лише каталог aus007a має значні нев'язки з рештою каталогів. Для решти пар каталогів залишкові різниці на порядок нижчі.



Порівняння каталогів: «зовнішні» оцінки середніх квадратичних похибок каталогів

## ОЦІНКИ «ЗОВНІШНЬОЇ» ТОЧНОСТІ КАТАЛОГІВ РАДІОДЖЕРЕЛ

На останньому кроці порівняння було виконано «зовнішнє» оцінювання точності каталогів радіоджерел. Для пари каталогів ми можемо записати (з деякими припущеннями):

$$\overline{d_{12}^2} = \frac{2}{1} \frac{2}{2} \frac{1}{1} \frac{2}{2},$$

де  $\overline{d_{12}^2}$  — зважені середні квадратичні різниці однієї з координат каталогів,  $\frac{2}{1}$  і  $\frac{2}{2}$  — «зовнішні» оцінки середніх квадратичних похибок каталогів і  $\frac{1}{1}$  і  $\frac{2}{2}$  — відповідні коефіцієнти кореляції. Записуючи такі рівняння для трьох каталогів, ми можемо побудувати систему рівнянь і розв'язати її відносно  $\frac{2}{1}$ ,  $\frac{2}{2}$  і  $\frac{1}{3}$ . Детальніше даний метод обчислення «зовнішніх» похибок подано в роботі [1].

Результати обчислення «зовнішніх» оцінок точності представлено на рисунку. В цих порівняннях ми використали об'єднаний розв'язок як третій каталог. Обчислення були зроблені для всіх спільних радіоджерел в трьох каталогах.

Як і очікувалось, каталог aus007a має найбільші «зовнішні» похибки, об'єднаний каталог — найменші. Каталог bkg001a має значну невизначеність по схиленню серед інших каталогів. Решта пар мають «зовнішні» похибки однакового порядку і незначні по величині.

## ВИСНОВКИ

Каталоги, отримані з використанням незалежних програмних комплексів CALC/SOLVE, SteelBreeze та QUASAR, не мають значних розходжень між собою. Систематичні розходження між індивідуальними каталогами, крім aus007a, малі — на рівні 30 мксд. На основі проведених порівнянь можемо стверджувати, що індивідуальні каталоги (крім aus007a) практично однакові за точністю. Систематичні різниці кутів обертання не перевищують 100 мксд для каталогу aus007a та близькі до 25 мксд для інших індивідуальних каталогів. Об'єднаний каталог ma0C08a суттєво не відрізняється від індивідуальних каталогів, але у ньому подано найбільш повний набір радіоджерел.

У роботі були використані індивідуальні каталоги обробки РНДБ-спостережень, які надає Міжнародна служба РНДБ для задач геодезії та астрономії [6].

Автор вдячна С. Л. Болотіну за допомогу в розрахунках та Я. С. Яцківу за критичні зауваження.

1. Болотін С. Л., Литвин С. О. Порівняння об'єднаних каталогів RSC(GAUA)05 C 03 та RSC(PUL)06 C 02 з реалізацією Міжнародної небесної системи відліку ICRF // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—26, N 1.—С. 31—42.



2. Курьянова А. Н., Яцків Я. С. Сводный каталог положений внегалактических радиоисточников RSC(GA UA)91 C 01 // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—**9**, N 2.—С. 15—25.
3. Яцків Я. С., Корсунь А. О., Хода О. О. Базове координатно-часове забезпечення розвитку в Україні топографо-геодезичної діяльності, землеупорядкування та навігації рухомих об'єктів // Інноваційні технології.—2003.—**1**, № 4-5.—С. 4—20.
4. Bolotin S., Lytvyn S. Comparison of radio source positions from individual solutions // The 5th IVS General Meeting Proc. / Eds A. Finkelstein, D. Behrend. — 2008.—P. 270—274.
5. IERS Annual Report 1993. — Paris: Observatoire de Paris, 1994.
6. Schlueter W., Himwich E., Nothnagel A., et al. IVS and its important role in the maintenance of the Global Reference System // Adv. Space Res.—2002.—**30**, N 2. —P. 145—150.

Надійшла до редакції 23.03.10