

УДК 528.874.7+528.48:520.87.7

О. В. Болотіна¹, О. М. Самойленко², С. Л. Болотін¹, В. Л. Козел²¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного 27²ДП «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації,
метрології, сертифікації та захисту прав споживачів»
03143 Київ, вул. Метрологічна 4**Дослідження нестабільності положення пунктів
станції колокації «Сімеїз — Кацівелі»**

Проаналізовано геодезичні прив'язки між пунктами РНДБ-, ЛЛС- та GPS-спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі». Підтверджено висновок про нестабільність даного геодинамічного полігону. Зроблено висновок про необхідність регулярних, з періодом 1—2.5 роки, перевизначень локальних геодезичних прив'язок на цій станції колокації. Побудовано лінійну модель зміни з часом оцінок геодезичних прив'язок цього полігону. Приведено результати порівняння оцінок геодезичних прив'язок з різницями відповідних координат пунктів спостережень, заданих ITRF2000. Зроблено висновок про існування систематичних похибок в ITRF2000, пов'язаних з некоректним визначенням швидкостей пунктів спостережень станції колокації з однаковим DOMES-номером. Запропоновано надати пунктам спостережень нестабільних геодинамічних полігонів різних DOMES-номерів. Порівняно оцінки геодезичних прив'язок з різницями відповідних координат пунктів спостережень, отриманих з індивідуальних РНДБ-, ЛЛС- та GPS-розв'язків. Виявлено їхню неузгодженість.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ СТАНЦИИ КОЛОКАЦИИ «СИМЕИЗ — КАЦИВЕЛИ», Болотина О. В., Самойленко А. Н., Болотин С. Л., Козел В. Л. — Проанализированы геодезические привязки между пунктами РСДБ-, ЛЛС- и GPS-наблюдений станции колокации «Симеиз — Кацевели». Подтвержден вывод о нестабильности данного геодинамического полигона. Сделано заключение о необходимости регулярных, с периодом 1—2.5 года, переопределений локальных геодезических привязок на этой станции колокации. Построена линейная модель изменения со временем оценок геодезических привязок этого полигона. Приведены результаты сравнения оценок геодезических привязок с разностями соответствующих координат пунктов наблюдений, заданных в ITRF2000. Сделан вывод о существовании систематических ошибок в ITRF2000, связанных с некорректным определением ско-

ростей пунктів спостережень станції колокації з однаковим DOMES-номером. Предложено присвоить пунктам спостережень нестабільних геодинамічних полігонів різних DOMES-номерів. Выполнено сравнение оценок геодезических привязок с разностями соответствующих координат пунктов спостережень, полученных из индивидуальных РСДБ-, ЛЛС- и GPS-решений. Обнаружена их несогласованность.

INVESTIGATION OF INSTABILITY OF POINT POSITION FOR THE COLLOCATION STATION «SIMEIZ-KATZIVELY», by Bolotina O. V., Samoilenko A. N., Bolotin S. L., Kozel V. L. — We analysed local geodetic ties (eccentricities) between the VLBI, SLR and GPS reference points of the collocation station «Simeiz-Katzively». The conclusion about in stability of this geodynamic test area is confirmed. Regular, with a period of 1-2.5 years, determination of the eccentricities is recommended for this collocation station. Linear time model is developed for local geodetic ties of this test area. The eccentricities were compared with ITRF2000 data. Systematic errors of ITRF2000 connected with incorrect determination of velocities of VLBI, SLR and GPS reference points of the collocation station with equal DOMES number were detected. It is recommended to assign different domain numbers to these reference points. The measured eccentricities were compared with the results of individual solutions for VLBI, SLR and GPS observations. Their disagreement are discussed.

ВСТУП

Як відомо, Міжнародна земна система відліку (ITRF) є реалізацією Міжнародної земної системи координат (ITRS). ITRF задається сукупністю координат реперних точок пунктів спостережень космічної геодезії та геодинаміки, жорстко пов'язаних з земною поверхнею:

- пунктів лазерної локації штучних супутників Землі та Місяця (ЛЛС);
- пунктів радіоінтерферометричних спостережень з наддовгими базами (РНДБ);
- пунктів радіотехнічних спостережень Глобальних навігаційних систем (ГНСС): GPS, ГЛОНАСС, Galileo;
- пунктів доплерівських спостережень штучних супутників Землі (DORIS).

Реалізації ITRF можна побудувати за даними роздільного аналізу ЛЛС-, РНДБ-, ГНСС-, DORIS-спостережень, або з спільного аналізу спостережень різних типів. Реалізації ITRF при цьому будуть базуватись на різній підмножині координат реперних точок пунктів спостережень.

Визначення високоточних геодезичних прив'язок (різниць координат) між реперними (редукційними) точками пунктів спостережень станцій колокації (станції колокації — локальні геодинамічні полігони, на яких розташовано два або більше пунктів спостережень космічної геодезії та геодинаміки) та дослідження їхньої динаміки є пріоритетними завданнями сучасної космічної геодезії та геодинаміки.

Їхнє розв'язання дозволить вирішити такі проблеми.

1. Узгодити різні реалізації Міжнародної земної системи відліку.
2. Досліджувати довгострокову стабільність ITRF [11].
3. Здійснювати контроль визначень координат пунктів спостережень ЛЛС-, РНДБ-, GPS-, DORIS-методами космічної геодезії та геодинаміки.
4. Виявити систематичні похибки ЛЛС-, РНДБ-, GPS-, DORIS-методів.

5. Реалізувати спільний аналіз різних типів спостережень космічної геодезії та геодинаміки на рівні об'єднання умовних рівнянь.

6. Досліджувати локальні зміщення пунктів (деформації) геодинамічних полігонів (геодинамічний полігон — майданчик, на якому побудовано локальну геодезичну лінійно-кутову мережу, що включає спеціалізовані геодезичні пункти), на яких розташовані станції колокації.

З метою визначення геодезичних прив'язок на станціях колокації проводять геодезичні кампанії. Проведення геодезичної кампанії передбачає побудову на геодинамічному полігоні високоточної локальної геодезичної лінійно-кутової мережі та використання спеціалізованих методів прив'язки реперних точок пунктів спостережень космічної геодезії та геодинаміки до точок мережі. Періодичне проведення геодезичних кампаній на одному й тому ж геодинамічному полігоні дозволяє перевизначати геодезичні прив'язки та шляхом порівняльного аналізу досліджувати динаміку їхніх змін з часом і відслідковувати локальні рухи пунктів спостережень. Порівняння отриманих геодезичними методами прив'язок між реперними точками пунктів спостережень станції колокації з різницями відповідних координат, одержаних методами космічної геодезії та геодинаміки, дозволяє, зокрема, здійснювати контроль визначень координат та швидкостей пунктів ЛЛС-, РНДБ-, GPS-, DORIS-спостережень.

Метою даної роботи є дослідження змін геодезичних прив'язок між реперними точками пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» за період з 1994 по 2004 рр. та контроль за визначенням координат і швидкостей пунктів ЛЛС-, РНДБ-, GPS-спостережень методами космічної геодезії та геодинаміки. Зауважимо, що станція колокації «Сімеїз — Кацівелі» внесена до переліку об'єктів, для яких уточнення геодезичних прив'язок є першочерговим завданням [11].

В роботі були використані:

- результати аналізу геодезичних спостережень, отриманих за даними двох геодезичних кампаній [4—6];
- дані ITRF2000 [14];
- результати аналізу GPS-спостережень за даними двох GPS-кампаній [7, 9];
- результати обробки отриманих міжнародною мережею станцій ЛЛС-спостережень, проведеної в центрі аналізу ЛЛС-спостережень ГАО НАН України;
- результати обробки отриманих міжнародною мережею РНДБ-спостережень, проведеної в центрі аналізу РНДБ-спостережень ГАО НАН України.

АНАЛІЗ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИВ'ЯЗОК НА СТАНЦІЇ КОЛОКАЦІЇ «СІМЕЇЗ — КАЦІВЕЛІ»

Станція колокації «Сімеїз — Кацівелі» (рисунок) є однією з двох українських станцій колокації космічної геодезії та геодинаміки. На локальному геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» розміщені чотири постійно діючі пункти спостережень: РНДБ-станція «Сімеїз» (позначення S008), GPS-станція «Сімеїз» (позначення M002), ЛЛС-станція «Сімеїз» (позначення S003) та ЛЛС-станція «Кацівелі» (позначення S006).

Пункти спостережень входять до складу Української мережі станцій космічної геодезії та геодинаміки [10], є ланками Європейської перманентної GPS-мережі (EPN, <http://www.epncb.oma.be>) і Міжнародної ГНСС-

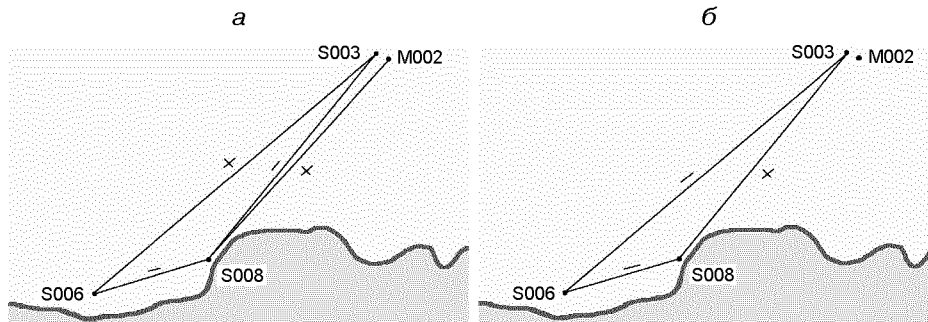


Схема розташування пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі»: *а* — залишкові різниці (індивідуальні розв'язки — геодезичні прив'язки), *б* — залишкові різниці (індивідуальні розв'язки — ITRF2000)

служби (IGS, <http://igscb.jpl.nasa.gov>), Міжнародної РНДБ-служби (IVS, <http://ivscb.gsfc.nasa.gov>) та Міжнародної служби лазерної локації (ILRS, <http://ilrs.gsfc.nasa.gov>), характеризуються значною — до 15 років — історією спостережень.

На локальному геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» мали місце дві геодезичні кампанії.

Перша геодезична кампанія відбулась 1—20 серпня 1994 р. [4]. Під час її проведення була створена локальна геодезична мережа геодинамічного полігону. За результатами кампанії були, зокрема, визначені локальні геодезичні прив'язки між реперними точками РНДБ-пункту «Сімеїз», ЛЛС-пункту «Сімеїз» та ЛЛС-пункту «Кацівелі» на епоху $T_1 = 1994.7$ в системі ITRF1992, яка є однією з реалізацій ITRS. GPS-пункт «Сімеїз» на той час встановлений не був.

З метою подальшого аналізу отримані за результатами першої кампанії геодезичні прив'язки були приведені в систему ITRF2000 на епоху $T_1 = 1994.7$ за алгоритмами, описаними в роботах [13, 14, 16]:

$$\begin{aligned} \Delta R_{S003-S008}(T_1) &= \\ &= \{-1328.6240, 197.5000, 1461.0660\} \pm \{0.0050, 0.0050, 0.0090\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S008}(T_1) &= \\ &= \{713.4940, -426.8750, -335.0680\} \pm \{0.0030, 0.0090, 0.0150\}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S003}(T_1) &= \\ &= \{2042.1180, -624.3750, -1796.1340\} \pm \{0.0050, 0.0100, 0.0180\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут і далі в роботі геодезичні прив'язки і оцінки координат приведені в метрах, а оцінки швидкостей — в метрах за рік.

Друга геодезична кампанія мала місце 4—24 серпня 2004 р. [5, 6]. За її результатами були визначені локальні геодезичні прив'язки між реперними точками РНДБ-пункту «Сімеїз», ЛЛС-пункту «Сімеїз», GPS-пункту «Сімеїз» та ЛЛС-пункту «Кацівелі» на епоху $T_2 = 2004.7$ в системі ITRF2000, яка є сучасною реалізацією ITRS:

$$\begin{aligned} \Delta R_{S003-S008}(T_2) &= \\ &= \{-1328.6390, 197.5080, 1461.0600\} \pm \{0.0029, 0.0031, 0.0058\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S008}(T_2) &= \\ &= \{713.5100, -426.8640, -335.1130\} \pm \{0.0014, 0.0055, 0.0089\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S003}(T_2) &= \\ &= \{2042.1490, -624.3720, -1796.1730\} \pm \{0.0032, 0.0063, 0.0106\}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{M002-S008}(T_2) &= \\ &= \{-1333.7760, 196.8970, 1467.8450\} \pm \{0.0023, 0.0037, 0.0065\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналіз цих даних показав таке.

- Локальні геодезичні прив'язки між пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» не є постійними на інтервалі часу 1994.7—2004.7. Це є ознакою нестабільності геодинамічного полігону в цілому. З виразів (1)—(7) отримано різниці оцінок відповідних геодезичних прив'язок в системі ITRF2000:

$$\begin{aligned} \delta \Delta R_{S003-S008}(T_0) &= \\ &= \{-0.0150, 0.0080, -0.0060\} \pm \{0.0058, 0.0059, 0.0107\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta \Delta R_{S006-S008}(T_0) &= \\ &= \{0.0160, 0.0110, -0.0450\} \pm \{0.0033, 0.0105, 0.0174\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta \Delta R_{S006-S003}(T_0) &= \\ &= \{0.0310, 0.0030, -0.0390\} \pm \{0.0059, 0.0118, 0.0209\}. \end{aligned} \quad (10)$$

- Різниці оцінок геодезичних прив'язок за період 1994.7—2004.7 між різними пунктами спостережень полігону не збігаються. Це свідчить про локальні рухи пунктів спостережень станції колокації, зокрема про різну швидкість зміни координат пунктів спостережень, що може бути викликане локальними зсувами ґрунту, розломами тощо. З цього випливає необхідність регулярних перевизначень локальних прив'язок між пунктами полігону, про що вказувалось в роботах [6, 11].
- Зміну оцінок геодезичних прив'язок $\Delta R_{i-j}(T)$ між i -м та j -м пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» за період 1994.7—2004.7 на даному етапі досліджень можна представити лінійною залежністю (моделлю) виду:

$$\Delta R_{i-j}(T) = \Delta R_{i-j}(T_0) + \Delta V_{i-j} \cdot (T - T_0), \quad (11)$$

де $\Delta R_{i-j}(T_0)$ є оцінкою геодезичних прив'язок на епоху T_0 , а ΔV_{i-j} — швидкість зміни геодезичних прив'язок між i -м та j -м пунктами спостережень.

- Швидкість зміни геодезичних прив'язок між пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» за даними геодезичних вимірювань за період 1994.7—2004.7 становить

$$\begin{aligned} \Delta V_{S003-S008} &= \\ &= \{-0.0015, 0.0008, -0.0006\} \pm \{0.0006, 0.0006, 0.0011\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{S006-S008} &= \\ &= \{0.0016, 0.0011, -0.0045\} \pm \{0.0003, 0.0011, 0.0017\}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{S006-S003} &= \\ &= \{0.0031, 0.0003, -0.0039\} \pm \{0.0006, 0.0012, 0.0021\}. \end{aligned} \quad (14)$$

- Через особливості розташування швидкість зміни геодезичних прив'язок між GPS-пунктом «Сімеїз» і РНДБ-пунктом «Сімеїз» можна вважати рівною швидкості зміни геодезичних прив'язок між ЛЛС-пунктом «Сімеїз» і РНДБ-пунктом «Сімеїз».
- Оцінки геодезичних прив'язок між пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» в системі ITRF2000 на стандартну епоху $T_0 = 1997.0$ за даними геодезичних вимірювань становлять:

$$\begin{aligned} \Delta R_{S003-S008}(T_0) &= \\ &= \{-1328.6275, 197.5018, 1461.0646\} \pm \{0.0053, 0.0055, 0.0101\}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S008}(T_0) &= \\ &= \{713.4977, -426.8725, -335.0784\} \pm \{0.0029, 0.0098, 0.0161\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{S006-S003}(T_0) &= \\ &= \{2042.1251, -624.3743, -1796.1429\} \pm \{0.0056, 0.0111, 0.0193\}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{M002-S008}(T_0) &= \\ &= \{-1333.7640, 196.8908, 1467.8496\} \pm \{0.0029, 0.0047, 0.0082\}. \end{aligned} \quad (18)$$

ПРО УЗГОДЖЕНІСТЬ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИВ'ЯЗОК ПУНКТИВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ СТАНЦІЇ КОЛОКАЦІЇ «СІМЕЇЗ — КАЦІВЕЛІ» З ITRF2000

Три пункти спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» (РНДБ-станція «Сімеїз», ЛЛС-станція «Сімеїз» та «Кацівелі») використовувались при побудові ITRF2000. При визначенні координат пунктів застосовувався один з методів спільного аналізу спостережень космічної геодезії та геодезичних різних типів, а саме метод об'єднання результатів роздільного аналізу спостережень різних типів на рівні нормальних рівнянь. Координати пунктів спостережень в системі ITRF2000 приведені на епоху $T_0 = 1997.0$ [14]. Швидкості всіх пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» при побудові ITRF2000 покладалась однаковою і сталими у часі.

Різниця відповідних координат пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі», які є аналогами геодезичних прив'язок, в цій системі на епоху $T_0 = 1997.0$ дорівнюють

$$\begin{aligned} \Delta L_{S003-S008}(T_0) &= \\ &= \{-1328.5400, 197.5950, 1461.2390\} \pm \{0.0171, 0.0151, 0.0202\}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \Delta L_{S006-S008}(T_0) = \\ & = \{713.5260, -426.8640, -335.0540\} \pm \{0.0092, 0.0082, 0.0076\}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \Delta L_{S006-S003}(T_0) = \\ & = \{2042.0660, -624.4590, -1796.2930\} \pm \{0.0192, 0.0170, 0.0212\}. \end{aligned} \quad (21)$$

З порівняння (15)—(17) та (19)—(21) випливає, що відповідні величини не збігаються, а їхні різниці дорівнюють:

$$\begin{aligned} & \Delta L_{S003-S008}(T_0) - \Delta R_{S003-S008}(T_0) = \\ & = \{0.0874, 0.0932, 0.1744\} \pm \{0.0179, 0.0161, 0.0226\}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \Delta L_{S006-S008}(T_0) - \Delta R_{S006-S008}(T_0) = \\ & = \{0.0283, 0.0085, 0.0244\} \pm \{0.0096, 0.0128, 0.0174\}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \Delta L_{S006-S003}(T_0) - \Delta R_{S006-S003}(T_0) = \\ & = \{-0.0591, -0.0847, -0.1501\} \pm \{0.0200, 0.0203, 0.0286\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Різниці (22)—(24) перевищують похибку визначення координат пунктів спостережень. Очевидно, що оцінки $\Delta L_{S003-S008}(T_0)$ і $\Delta L_{S006-S008}(T_0)$ є завищеними відносно $\Delta R_{S003-S008}(T_0)$ і $\Delta R_{S006-S008}(T_0)$. У той же час величини $\Delta L_{S006-S003}(T_0)$ занижені відносно $\Delta R_{S006-S003}(T_0)$.

Наявність різниць (22)—(24) може бути наслідком:

- недоступності результатів геодезичних кампаній міжнародному науковому загалу, про що вказувалось в роботі [12];
- недосконалості та наявності систематичних похибок методу спільного аналізу різних типів спостережень космічної геодезії та геодинаміки, який використовувався при побудові ITRF2000, що проявляється в некоректному (неузгодженому) визначенні оцінок координат пунктів;
- некоректного припущення при створенні ITRF2000 про те, що швидкості всіх пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» є однаковими і незмінними з часом;
- некоректного визначення оцінки швидкості пунктів спостережень станції колокації, яка в ITRF2000 становить:

$$V^0 = \{-0.0198, 0.0164, 0.0084\} \pm \{0.0010, 0.0007, 0.0012\}. \quad (25)$$

Відзначимо, що третє положення узгоджується з отриманими оцінками швидкості зміни геодезичних прив'язок між пунктами спостережень станції колокації (12)—(14).

Також зауважимо, що всі пункти спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» мають однаковий DOMES-номер, рівний 12337 (DOMES — алфавітно-цифрова система, введена в 1980 р. з метою ідентифікації реперних точок станцій спостережень космічної геодезії та геодинаміки). В реалізації деяких програмних забезпечень для аналізу спостережень космічної геодезії та геодинаміки закладено умову, за якою оцінки швидкостей пунктів спостережень з однаковим DOMES-номером збігаються. Як випливає з роботи [14], ця особливість притаманна і методу спільного аналізу спостережень, який використовувався при побудові ITRF2000.

Очевидно, що:

- а) така умова не є коректною, і необхідно переглянути алгоритми програмних забезпечень;
- б) пунктам спостережень нестабільних геодинамічних полігонів повинні надаватись різні DOMES-номери.

**ПРО УЗГОДЖЕНІСТЬ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИВ'ЯЗОК
ПУНКТИВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ СТАНЦІЙ КОЛОКАЦІЇ «СІМЕЇЗ — КАЦІВЕЛІ»
З ІНДИВІДУАЛЬНИМИ РОЗВ'ЯЗКАМИ**

Індивідуальні розв'язки. Координати та швидкості РНДБ-, ЛЛС- та GPS-пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» неодноразово визначались за даними спостережень космічної геодезії та геодинаміки в центрі аналізу РНДБ-спостережень ГАО НАНУ, центрі аналізу ЛЛС-спостережень ГАО НАНУ та локальному центрі аналізу GPS-даних ГАО НАНУ відповідно.

З метою визначення локальних прив'язок між GPS-маркерами на геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» були проведені чотири GPS-кампанії (в 1993, 1994, 2001 та 2004 рр.) [7—9, 12].

Координати GPS-пункту «Сімеїз» визначались лише за результатами GPS-кампаній 2001 р. [7] та 2004 р. [9] за допомогою програмного забезпечення «Bernese GPS Software ver. 4.2». GPS-кампанія 2001 р. на локальному геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» тривала з 10 по 12 жовтня. За її результатами були визначені оцінки координат GPS-пункту «Сімеїз» в системі ITRF97 на епоху $T_3 = 2001.78$ [7]. З метою подальшого аналізу ці оцінки були приведені в ITRF2000:

$$\mathbf{R}_{M002}(T_3) = \{3783897.1956, 2551404.3694, 4441264.2628\}. \quad (26)$$

GPS-кампанія 2004 р. на локальному геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» мала місце з 8 по 9 вересня. За її результатами оцінки координат GPS-пункту «Сімеїз» були встановлені в системі ITRF2000 на епоху $T_4 = 2004.6$ [9]:

$$\mathbf{R}_{M002}(T_4) = \{3783897.1164, 2551404.4112, 4441264.2662\}. \quad (27)$$

Покладаючи, що координати GPS-пункту «Сімеїз» змінюються лінійно за (11), була визначена швидкість зміни його координат за даними аналізу GPS-спостережень у системі ITRF2000 за період 2001.78—2004.6:

$$\mathbf{V}_{M002} = \{-0.0281, 0.0148, 0.0012\}. \quad (28)$$

За (11) та (28) були оцінені координати GPS-пункту «Сімеїз» на епоху $T_0 = 1997.0$:

$$\mathbf{R}_{M002}(T_0) = \{3783897.330, 2551404.299, 4441264.257\}. \quad (29)$$

За результатами аналізу РНДБ-спостережень, отриманих станціями міжнародної РНДБ-мережі за період з 28 січня 1994 р. по 20 лютого 2007 р., в центрі аналізу РНДБ-спостережень ГАО НАНУ були визначені оцінки координат РНДБ-пункту «Сімеїз» в системі ITRF2000 на епоху $T_0 = 1997.0$ та швидкості змін координат:

$$\begin{aligned} & \mathbf{R}_{S008}(T_0) = \\ & = \{3785231.066, 2551207.414, 4439796.382\} \pm \{0.0010, 0.0010, 0.0020\}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$V_{S008} = \{-0.0198, 0.0168, 0.0100\} \pm \{0.0004, 0.0002, 0.0004\}. \quad (31)$$

Для розрахунків використовувалось програмне забезпечення «SteelBreeze». Застосовувались моделі і методи, рекомендовані в роботі [16].

За результатами аналізу ЛЛС-спостережень спеціалізованих штучних супутників Землі LAGEOS-1 та LAGEOS-2, отриманих станціями міжнародної ЛЛС-мережі за період 1989.01—2004.86, в центрі аналізу ЛЛС-спостережень ГАО НАНУ були визначені оцінки координат та швидкостей ЛЛС-пунктів «Сімеїз» та «Кацівелі» в системі GAOUA на епоху $T_0 = 1997.0$ [1, 2]. Спостереження оброблялись програмним забезпеченням «Київ — Геодинаміка». Використовувались моделі і методи, рекомендовані в [15]. З метою подальшого аналізу отримані оцінки були приведені в ITRF2000:

$$\begin{aligned} R_{S003}(T_0) &= \\ &= \{3783902.547, 2551404.976, 4441257.692\} \pm \{0.0050, 0.0050, 0.0040\}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} R_{S006}(T_0) &= \\ &= \{3785944.672, 2550780.642, 4439461.505\} \pm \{0.0030, 0.0030, 0.0030\}. \end{aligned} \quad (33)$$

Оцінки швидкостей ЛЛС-станцій «Кацівелі» та «Сімеїз», отримані за допомогою програмного забезпечення «Київ — Геодинаміка» є однаковими, що пов'язано з особливістю його програмної реалізації щодо станцій з однаковим DOMES-номером:

$$\begin{aligned} V_{S003} &= V_{S006} = \\ &= \{-0.0267, 0.0120, 0.0160\} \pm \{0.0004, 0.0002, 0.0004\}. \end{aligned} \quad (34)$$

Про узгодженість визначень координат пунктів спостережень. Різниці оцінок координат пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» в системі ITRF2000 на епоху $T_0 = 1997.0$, які отримані з індивідуальних розв'язків, становлять

$$\begin{aligned} \Delta D_{S003-S008}(T_0) &= \\ &= \{-1328.5190, 197.5620, 1461.3100\} \pm \{0.0051, 0.0051, 0.0045\}, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \Delta D_{S006-S008}(T_0) &= \\ &= \{713.6060, -426.7720, -334.8770\} \pm \{0.0032, 0.0032, 0.0036\}, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Delta D_{S006-S003}(T_0) &= \\ &= \{2042.1250, -624.3340, -1796.1870\} \pm \{0.0058, 0.0058, 0.0050\}, \end{aligned} \quad (37)$$

$$\Delta D_{M002-S008}(T_0) = \{-1333.7360, 196.8850, 1467.8750\}. \quad (38)$$

З порівняння (35)—(38) з геодезичними прив'язками (15)—(18) випливає, що відповідні величини не збігаються, а їхні різниці становлять:

$$\begin{aligned} \Delta D_{S003-S008}(T_0) - \Delta R_{S003-S008}(T_0) &= \\ &= \{0.1084, 0.0602, 0.2454\} \pm \{0.0074, 0.0075, 0.0110\}, \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & \Delta D_{S006-S008}(T_0) - \Delta R_{S006-S008}(T_0) = \\ & = \{0.1083, 0.1005, 0.2013\} \pm \{0.0043, 0.0103, 0.0165\}, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & \Delta D_{S006-S003}(T_0) - \Delta R_{S006-S003}(T_0) = \\ & = \{-0.0001, 0.0403, -0.0441\} \pm \{0.0081, 0.0125, 0.0199\}, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\Delta D_{M002-S008}(T_0) - \Delta R_{M002-S008}(T_0) = \{0.0280, -0.0058, 0.0254\}. \quad (42)$$

Оцінки (39)—(40) на порядок перевищують точність визначення координат пунктів РНДБ- та ЛЛС-спостережень. Наявність залишкових різниць (39)—(42) може бути пов'язане з:

- наявністю систематичних похибок індивідуальних розв'язків;
- неузгодженістю індивідуальних ЛЛС-, РНДБ- та GPS-реалізацій ITRF;
- неврахованими локальними рухами пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі», що збігається з висновками [7];
- господарчою діяльністю в районі геодезичного полігону [7].

Відмітимо, що залишкові різниці $\Delta D_{S003-S008}(T_0) - \Delta R_{S003-S008}(T_0)$ і $\Delta D_{S006-S008}(T_0) - \Delta R_{S006-S008}(T_0)$ є на порядок більшими за $\Delta D_{S006-S003}(T_0) - \Delta R_{S006-S003}(T_0)$ і $\Delta D_{M002-S008}(T_0) - \Delta R_{M002-S008}(T_0)$. Таке «розшарування» може бути наслідком зміщення та відмінності орієнтації індивідуальної ЛЛС-реалізації ITRF відносно індивідуальних РНДБ- та GPS-реалізацій ITRF (рисунок а). Зауважимо, що знаком «мінус» на рисунку позначено залишкові різниці довжиною понад 0.1 м, а знаком «плюс» — довжиною менше 0.1 м.

У той же час порівняння різниць координат, отриманих з індивідуальних розв'язків та за даними ITRF2000, показує, що оцінки (35)—(37) відрізняються від оцінок (19)—(21) на величини:

$$\begin{aligned} & \Delta D_{S003-S008}(T_0) - \Delta L_{S003-S008}(T_0) = \\ & = \{0.0210, -0.0330, 0.0710\} \pm \{0.0186, 0.0169, 0.0230\}, \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} & \Delta D_{S006-S008}(T_0) - \Delta L_{S006-S008}(T_0) = \\ & = \{0.0800, 0.0920, 0.1770\} \pm \{0.0102, 0.0132, 0.0178\}, \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} & \Delta D_{S006-S003}(T_0) - \Delta L_{S006-S003}(T_0) = \\ & = \{0.0590, 0.1250, 0.1060\} \pm \{0.0208, 0.0211, 0.0291\}. \end{aligned} \quad (45)$$

На основі аналізу (43)—(45) і (22)—(24) можна констатувати, що різниці координат пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі», отримані на основі індивідуальних розв'язків, в цілому не збігаються з відповідними різницями, обчисленими за даними ITRF2000. Оцінки (43)—(45) на порядок перевищують точність визначення координат пунктів РНДБ- та ЛЛС-спостережень. Причинами наявності цих різниць, окрім згаданих вище, можуть бути:

- наявність систематичних похибок при побудові ITRF2000,
- неузгодженість індивідуальних ЛЛС-, РНДБ- та GPS-реалізацій ITRF з ITRF2000,
- некоректне визначення координат ЛЛС-пункту «Кацівелі» в ITRF2000 (рисунок б).

Про узгодженість визначень швидкостей пунктів спостережень.

Різниці отриманих з індивідуальних розв'язків оцінок швидкостей пунктів спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» (28), (31) та (34), не збігаються з визначеними на основі геодезичних вимірювань оцінками (12)—(14).

Причинами цього можуть бути кілька чинників.

1. На оцінку швидкості може впливати метод оцінювання [3]: урівнювання за (11) оцінок координат для різних епох, визначених на основі коротких рядів спостережень (використовувався для визначення V_{M002}), або аналіз довготривалого масиву спостережень з метою одночасного визначення координат і швидкостей пунктів (використовувався для визначення V_{S008} , V_{S003} , V_{S006}). За [3] перша зі згаданих методик є менш коректною. Тому оцінки V_{M002} можна вважати такими, що потребують уточнення.

2. В діючій реалізації програмного забезпечення «Київ — Геодинаміка» закладено умову рівності швидкостей пунктів спостережень з однаковим DOMES-номером, що, як вказувалось вище, не є коректним і протирічить оцінкам (14). Таким чином, оцінки V_{S003} , V_{S006} можна вважати такими, що повинні бути перевизначені при умові внесення корекцій у процедуру визначення швидкостей програмного забезпечення «Київ — Геодинаміка».

3. Оцінки V_{S008} , отримані з аналізу РНДБ-спостережень, збігаються у межах похибок (за виключенням координати Z) з визначеними при створенні ITRF2000 величинами V^0 . Як висновок, оцінки V_{S008} можна вважати близькими до реальних.

На основі останнього положення за значеннями V_{S008} та визначеними за геодезичними вимірюваннями оцінками (12)—(14) можна відтворити «орієнтовні» оцінки швидкостей ЛЛС-станцій «Кацівелі» і «Сімеїз» та GPS-станції «Сімеїз»:

$$V_{S003}^0 = \{-0.0213, 0.0176, 0.0094\} \pm \{0.0007, 0.0006, 0.0011\}, \quad (46)$$

$$V_{S006}^0 = \{-0.0182, 0.0179, 0.0055\} \pm \{0.0005, 0.0011, 0.0018\}, \quad (47)$$

$$V_{M002}^0 = \{-0.0213, 0.0176, 0.0094\} \pm \{0.0007, 0.0006, 0.0011\}. \quad (48)$$

Розбіжність величин (46)—(48) та оцінок швидкостей ЛЛС-станцій «Кацівелі» і «Сімеїз» та GPS-станції «Сімеїз», отриманих з індивідуальних розв'язків, в середньому становить 0.005 м/рік, що на порядок перевищує точність визначення швидкостей пунктів спостережень. Це вказує на те, що або прийнята за вихідну оцінка V_{S008} є помилковою (що мало ймовірно), або прийнята нами лінійна модель зміни оцінок геодезичних прив'язок між пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» вимагає уточнення. Останнє є можливим лише за умови проведення нових геодезичних кампаній на геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі».

ВИСНОВКИ

Приведемо основні результати та рекомендації.

Підтверджено висновок [6] про нестабільність геодинамічного полігону «Сімеїз — Кацівелі» в цілому та про існування локальних рухів пунктів спостережень станції колокації. Зроблено заключення про необхідність проведення регулярних перевизначень локальних геодезичних прив'язок.

Враховуючи швидкість зміни оцінок геодезичних прив'язок та рівень точності оцінок координат методами космічної геодезії та геодинаміки (0.001—0.01 м), рекомендований інтервал між геодезичними кампаніями на полігоні повинен становити 1—2.5 роки, що узгоджується з даними [11].

За даними геодезичних вимірювань побудовано лінійну модель зміни з часом оцінок геодезичних прив'язок між пунктами спостережень станції колокації «Сімеїз — Кацівелі». Зроблено висновок про необхідність її уточнення.

Виявлено систематичні похибки методу спільного аналізу спостережень космічної геодезії та геодинаміки різних типів, який використовувався при побудові ITRF2000, що проявляється в неузгодженості координат пунктів станції колокації «Сімеїз — Кацівелі» з оцінками геодезичних прив'язок та некоректному визначенні швидкостей пунктів спостережень з однаковим DOMES-номером. Останнє необхідно врахувати при побудові нової реалізації ITRF2005.

Запропоновано надати пунктам спостережень нестабільних геодинамічних полігонів різних DOMES-номерів.

Показано неузгодженість індивідуальних ЛЛС-, РНДБ- та GPS-реалізацій ITRF, яка може бути наслідком систематичних похибок індивідуальних розв'язків, існуванням зсувів та відмінностей в орієнтації індивідуальних реалізацій ITRF. Зокрема зроблено висновок про існування зміщення та відмінності орієнтації індивідуальної ЛЛС-реалізації ITRF відносно індивідуальних РНДБ- та GPS-реалізацій ITRF.

Роботу виконано при частковій підтримці гранту Міністерства освіти і науки України No M/102-2007 «Високоточне і узгоджене визначення обертання Землі і Земної/Небесної систем відліку» в рамках Українсько-французької програми «Дніпро».

1. Болотіна О., Медведський М. Дослідження стабільності роботи станцій української ЛЛС-мережі. — Київ, 2006.—38 с.—(Препринт / НАН України. Головна астрономічна обсерваторія; ГАО-06-1У).
2. Болотіна О., Медведський М. Результати дослідження стабільності роботи українських станцій лазерної локації // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—23, № 1.—С. 11—17.
3. Козел О. В. Исследование эффекта непрессионного движения равноденствия по меридианным наблюдениям Солнца 1925—1982 гг. // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 1.—С. 70—78.
4. Самойленко А. Н. Локальная геодезическая сеть на Симеизском геодинамическом полигоне. — Киев, 1996.—36 с.—(Препринт / НАН Украины. Главная астрономическая обсерватория; ГАО-96-1Р).
5. Самойленко О. М. Геодезична прив'язка радіотелескопів та станцій лазерної локації супутників до GPS-маркерів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. праць. — Л.: Ліга-Прес, 2006.—С. 46—52.
6. Самойленко О. М., Хода О. О., Засць В. В. Результати геодезичної прив'язки радіотелескопу РТ-22 КРАО та станцій лазерної локації КРАО та КЛЮ до GPS маркерів на кримському геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—23, № 1.—С. 3—10.
7. Хода О. А. Обработка наблюдений GPS-кампании на Крымском геодинамическом полигоне «Симеиз — Кацивели» в 2001 г. // Кинематика и физика небес. тел.—2004.—20, № 6.—С. 502—510.
8. Хода О. О. Наблюдения спутников Глобальной системы определения местоположения (GPS) для геодинамических и ионосферных исследований в Украине: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 2000.—126.—Машинопись.
9. Хода О. О. Кампанія GPS-спостережень на Кримському геодинамічному полігоні «Сімеїз — Кацівелі» в 2004 р. // Зб. наук. праць міжнародної науково-практичної конф. «Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування — Європейський досвід». — Чернівці, 2006.—С. 29—32.

10. Яцків Я. С., Болотіна О. В., Болотін С. Л. та ін. Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки (Укргеокоосмережа). — Київ: Компанія ВАІТЕ, 2005.—60 с.
11. Altamimi Z. ITRF and collocation sites // IERS Technical Note.—2005.—N 33.—P. 8—15.
12. Bolotin S., Gaiovitch I., Khoda O., et al. GPS Observational campaign in the geodynamics test area «Simeiz-Katziveli»: Data processing and results // Космічна наука і технологія.—1995.— 1, № 2.—С. 3—12.
13. Boucher C., Altamimi Z., Duhem L. ITRF 92 and its associated velocity field // IERS Technical Note. — Observatoire de Paris, 1993.—N 15.—163 p.
14. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., et al. The ITRF 2000 // IERS Technical Note. — Francfurt am Main, 2007.—N 31.—289 p.
15. McCarthy D. D. IERS Conventions (1996) // IERS Technical Note. — Observatoire de Paris, 1996.—N 21.—95 p.
16. McCarthy D. D., Gerard Petit. IERS Conventions (2003) // IERS Technical Note. — Francfurt am Main, 2007.—N 32.—127 p.

Поступила в редакцію 22.11.07